

## Resum

En aquest projecte es realitza un estudi comparatiu de les accions del corrent d'aire al voltant d'una coberta corbada i tancada per tots els seus costats mitjançant programes de càlcul numèric basats en la Dinàmica Computacional de Fluids (CFD). L'objectiu de l'estudi es veure com la variació de l'angle d'orientació del vent i la llargada de la coberta influeixen el comportament fluidodinàmic i les pressions generades sobre la coberta. Per aquest motiu, l'estudi requereix un model tridimensional (3D).

El projecte s'inicia amb un repàs dels conceptes fonamentals sobre fluxos entorn de cossos, la descripció de les tècniques bàsiques per al seu anàlisi i les accions que els caracteritzen, aprofundint en el fenomen de la turbulència. A continuació es fa un resum de les normatives sobre accions del vent sobre estructures que existeixen i es segueix amb la descripció de la metodologia CFD per al seu anàlisi i la utilització del programa de càlcul numèric ANSYS CFX que s'ha emprat en aquest projecte.

A partir d'aquí, s'exposa la creació del domini i l'estudi per a obtenir el mallat òptim. Amb el model seleccionat es procedeix a presentar el conjunt de simulacions amb CFX.

Es realitzen tres simulacions amb diferents llargades de la coberta, que corresponen a: coberta base, coberta estreta i coberta infinita. La primera correspon a la coberta amb les dimensions prefixades establertes en estudis previs. Per a fer una primera prova de l'efecte de la llargada, es fa una coberta més curta. Finalment, per a poder menystenir els efectes laterals de la coberta es fa un estudi simulant una llargada infinita. En cadascun dels casos es fan quatre simulacions amb diferent angle d'orientació d'incidència del vent.

A partir dels resultats obtinguts de cadascuna de les simulacions es comparen els valors de les pressions en cada cas amb els establerts en la normativa i es confirma que són molt propers, confirmant-se d'aquesta manera la bondat del model numèric. Concretament, es comprova que els valors de la normativa són lleugerament superiors als simulats, la qual cosa és lògica pel fet que la normativa sempre és més restrictiva. Així doncs, s'obtenen conclusions sobre els efectes d'orientació i llargada pel cas base i el cas estret. En quant al cas de la coberta infinita, es fa una crítica del model emprat degut a l'aparició d'uns remolins laterals que no corresponen a la realitat i que estan provocats per una incorrecta definició del domini computacional.

# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>2</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>5</b>
1.1. Abreviatures.....	5
1.2. Nomenclatura.....	5
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del projecte.....	9
2.2. Motivació.....	9
2.3. Requeriments previs.....	9
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>10</b>
3.1. Objectius generals del projecte .....	10
3.2. Objectius parcials de l'estudi .....	10
3.3. Abast del projecte .....	10
<b>4. CONCEPTES TEÒRICS DEL PROJECTE</b>	<b>11</b>
4.1. Cobertes en forma d'arc .....	11
4.2. Flux entorn de cossos.....	12
4.2.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos [5].....	12
4.2.2. Turbulència.....	15
4.2.2.1. Nombre de Reynolds [6] .....	15
4.2.2.2. Definició de la turbulència.....	16
4.2.3. Capa límit .....	18
4.2.4. Forces d'un fluid al voltant d'un cos .....	20
4.3. Definició del model numèric .....	21
4.3.1. Introducció de CFD .....	21
4.3.2. Metodologia.....	22
4.3.3. Equacions resoltes pel programa .....	22
<b>5. NORMATIVES SOBRE ACCIONS DEL VENT EN ESTRUCTURES</b>	<b>25</b>
<b>6. DOMINI COMPUTACIONAL 3D</b>	<b>29</b>
6.1. Consideracions prèvies .....	29



6.2.	Geometria i domini computacional .....	29
6.3.	Condicions de contorn .....	31
6.4.	Sensibilitat de la malla .....	33
6.5.	Models de simulació .....	35
6.5.1.	Turbulència a prop les parets .....	35
6.6.	Càlcul de la solució .....	36
<b>7.</b>	<b>SIMULACIONS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS .....</b>	<b>39</b>
7.1.	Domini amb coberta base.....	40
7.2.	Domini amb coberta estreta.....	42
7.3.	Domini amb coberta infinita .....	45
7.4.	Comparativa amb la normativa europea .....	46
7.5.	Proposta de millora pel cas infinit .....	50
<b>8.</b>	<b>PLANIFICACIÓ .....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>IMPACTE MEDIAMBIENTAL .....</b>	<b>53</b>
9.1.	Referent a l'elaboració del projecte .....	53
9.2.	Referent a la construcció de la coberta .....	54
<b>10.</b>	<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>55</b>
10.1.	Costos directes .....	55
10.2.	Costos indirectes imputables.....	56
10.3.	Cost total del projecte .....	57
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>.....</b>	<b>58</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>.....</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>.....</b>	<b>60</b>
	Referències bibliogràfiques .....	60



# 1. Glossari

## 1.1. Abreviatures

*CAD: Computer-Aided Design (Disseny assistit per ordinador)*

*CAE: Computer-Aided Engineering*

*CFD: Computacional Fluid Dynamics (Mecànica computacional de fluids)*

*CFX: Software de CFD d'ANSYS*

*EIA: Estudi d'Impacte Ambiental*

*PI: Punt d'inflexió*

*PTC: Software de CAD*

*RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes*

*SST: Shear Stress Transport*

## 1.2. Nomenclatura

*A: Àrea ( $m^2$ )*

*A<sub>P</sub>: Àrea característica (o àrea projectada) ( $m^2$ )*

*a: Acceleració ( $m/s^2$ )*

*B: propietat d'un sistema*

*b: Llargada de la coberta (m)*

*C<sub>D</sub>: Coeficient de resistència a l'avanç (-)*

*C<sub>D,fricc</sub>: Coeficient de resistència a l'avanç degut a les friccions (-)*

*C<sub>D,press</sub>: Coeficient de resistència a l'avanç degut a les pressions (-)*

*C<sub>direcció</sub>: Coeficient de direcció que condiciona V<sub>b</sub> (-)*

*C<sub>estació</sub>: Coeficient d'estació que condiciona V<sub>b</sub> (-)*

*C<sub>L</sub>: Coeficient de sustentació (-)*

*C<sub>o</sub>: Factor d'orografia del terreny (-)*

$C_{pe}$ : Coeficient de pressió extern (-)

$C_r$ : Factor de rugositat del terreny (-)

$d$ : Corda de la coberta (m)

$E$ : Energia (J)

$F$ : Força (N)

$F_D$ : Força de resistència a l'avanç (N)

$F_L$ : Força de sustentació (N)

$f$ : Fletxa de l'arc de la coberta (m)

$g$ : Gravetat (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$h$ : Alçada de la coberta (m)

$I_v$ : Intensitat turbulenta (%)

$K_r$ : Factor de terreny (-)

$K_t$ : Factor de turbulència (-)

$L$ : Longitud característica (m)

$m$ : Massa (kg)

$P$ : Pressió (Pa)

$\dot{Q}$ : Flux de calor (W)

$q_p$ : Pressió de la velocitat de pic (Pa)

$Re$ : Nombre de Reynolds (-)

$t$ : Diferencial de temps (s)

$u$ : Velocitat en la direcció x (m/s)

$\bar{u}$ : Valor mig de la velocitat en la direcció x (m/s)

$u'$ : Component de fluctuació de la velocitat en la direcció x (m/s)

$u^+$ : Velocitat en direcció x adimensional (-)

$\vec{V}(x, y, z, t)$ : Vector velocitat ( $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ ) (m/s)

$V_b$ : Velocitat bàsica del vent (m/s)

$V_{b,0}$ : Velocitat del vent (m/s)

$V_m$ : Velocitat mitjana del vent (m/s)

$\dot{W}$ : Potència (W)

$W_e$ : Pressió externa a la superfície (Pa)

$y^+$  o  $Y_{plus}$ : distància a la paret adimensional, dins la capa límit (-)

$Z$ : Alçada total de la coberta (m)

$z_o$ : Longitud de la rugositat (m)

$\alpha_v$ : desviació estàndard de la turbulència (m/s)

$\beta$ : Derivada respecte la massa (m) d'una propietat del sistema (B) o propietat específica

$\gamma$ : Pes específic ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$ )

$\delta$ : Derivada parcial

$\mu$ : Viscositat dinàmica ( $\text{kg}/(\text{ms})$ )

$\nu$ : Viscositat cinemàtica ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho$ : Densitat ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\tau$ : Esforç tallant (Pa)





## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

Un estudi previ a aquest projecte va sorgir per a l'interès personal en ampliar els coneixements sobre la mecànica de fluids i, concretament, sobre l'estudi del flux entorn de cossos. En ell vaig aprendre molt sobre aquests conceptes i vaig agafar una forta agilitat amb programari de simulació com el *CFX* [1].

Fruit d'aquell projecte va sorgir aquest, mogut per l'interès creixent en l'àmbit de la mecànica de fluids i pel fet de voler aprofundir més i continuar, i finalitzar, l'estudi en el qual havia participat des d'un inici.

### 2.2. Motivació

Tinc molt clar que vull enfocar la meva carrera professional envers al disseny de producte. Això és deu al fet que hi ha dos blocs de coneixement que em fascinen: el CAD (*Computer-Aided Design*) i el CAE (*Computer-Aided Engineering*), en els quals he agafat un fort domini en el transcurs d'aquest projecte. Vull destacar que em sembla molt interessant tot l'estudi que es duu a terme gràcies a les simulacions. El fet de fer proves de diferents models d'una peça o cos i conèixer de manera ràpida les accions mecàniques i aerodinàmiques a la que es sotmet l'objecte d'estudi degut a accions externes abans de crear-lo.

D'altra banda, el fet de comparar els resultats obtinguts amb la normativa europea i corroborar-los per tal de garantir la seva veracitat m'ha impulsat a dur a terme aquest projecte amb un fort interès.

### 2.3. Requeriments previs

Per tal de dur a terme aquest treball és imprescindible disposar d'uns coneixements previs de Mecànica de Fluids, per a poder aprofundir en conceptes aerodinàmics, i de software CAD i CAE, per a poder realitzar les simulacions. També són importants coneixements d'altres assignatures com Gestió de Projectes per al bon plantejament i organització del treball, entre d'altres.

## 3. Introducció

### 3.1. Objectius generals del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar l'acció del vent sobre una coberta corbada i tancada per tots els costats. L'estudi es realitzarà mitjançant simulacions numèriques computacionals amb el programari CFX per tal de calcular les pressions provocades pel vent sobre l'estructura en 3D. Concretament s'estudiarà l'efecte de l'orientació del vent i de l'amplada de la coberta. Els resultats obtinguts es compararan amb la normativa actual. Aquest estudi és necessari degut a la manca de recomanacions de disseny en la normativa actual descrita al *Documento Básico SE-AE sobre Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación* de Març 2006 [1].

### 3.2. Objectius parcials de l'estudi

L'objectiu d'aquest estudi consisteix en fer una revisió exhaustiva de la normativa sobre accions del vent en estructures per tal de poder aplicar-la al cas d'aquest projecte. Per aquest motiu, s'analitzarà l'efecte de l'orientació del vent que incideix sobre la coberta, simulant els quatre casos més representatius:  $0^\circ$  (perpendicular a la coberta),  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$ . A més a més, s'avaluarà la influència de la llargada de la coberta en front als diferents angles d'orientació. Es realitzarà l'estudi sobre tres cobertes amb llargada curta, mitja i infinita.

### 3.3. Abast del projecte

L'estudi realitzat en aquest projecte correspon a simulacions 3D, que ens permeten entendre el comportament global de les accions que fa el vent sobre una coberta de manera precisa i detallada. Es realitza primer una simulació d'una coberta amb unes dimensions determinades. Posteriorment, s'estudiarà l'efecte de la llargada d'aquesta coberta, simulant dues geometries més: una amb un domini més curt i una simulant una coberta infinita. A més a més, la coberta infinita ens permetrà negligir l'efecte de les parets laterals de la coberta. En cada cas es duen a terme quatre simulacions, variant l'angle d'orientació del vent sobre la coberta. Es fa un estudi comparatiu entre cada coberta i cada cas, per veure l'efecte que produeix la variació d'aquest paràmetre sobre les accions fluidodinàmiques. A més a més, es compara amb els valors estipulats en la normativa.

Aquest projecte comprèn l'anàlisi dels resultats obtinguts amb les simulacions, sense corroborar-los amb dades experimentals per manca d'aquestes.



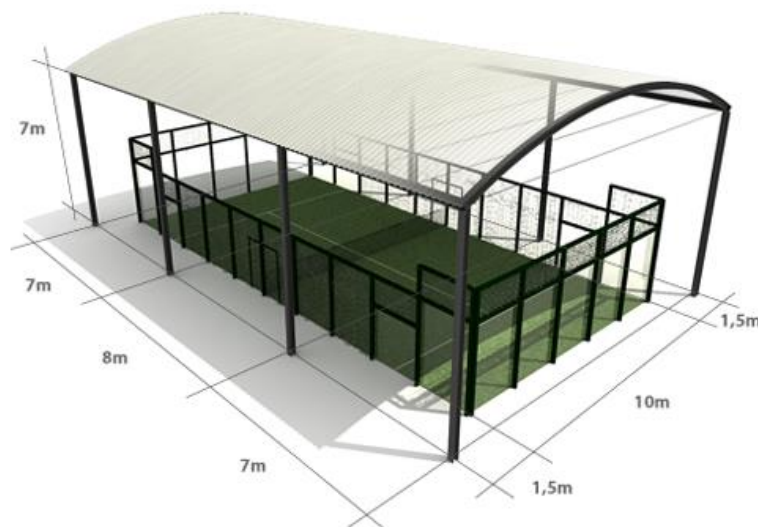
## 4. Conceptes teòrics del projecte

En aquest capítol es definiran tots els conceptes fonamentals per a desenvolupar i entendre el projecte amb claredat.

### 4.1. Cobertes en forma d'arc

Primerament cal definir quin és l'objecte d'estudi d'aquest projecte de forma acurada. Recordar que l'objectiu d'aquest treball és estudiar l'acció del vent sobre una coberta en forma d'arc per instal·lacions esportives, en concret, per a pistes de pàdel. S'ha decidit escollir aquest esport perquè en els últims anys ha anat creixent i popularitzant-se, fins al punt que, actualment, en gairebé tots els clubs esportiu disposen d'aquest tipus d'instal·lacions.

La coberta d'aquest estudi permet cobrir una o varies pistes de pàdel d'una manera senzilla i estètica. Aquesta és la solució idònia per aquest tipus de pistes poliesportives degut a les seves dimensions (10x20 m<sup>2</sup>). A la *Figura 4.1* es poden veure les dimensions que té l'estructura de la coberta de l'estudi.



*Figura 4.1* Coberta per pista de Pàdel **Error! Reference source not found.**

Els avantatges d'una pista de pàdel coberta són [4]:

- Evita el sol directe durant el migdia
- Permet jugar en dies de pluja
- No es produeix condensació en els cristalls/vidres per la nit
- Evita que la rosada del matí humitegi la pista
- Permet cobrir els passadissos laterals o perimetrals de la pista (fins a 13,3 m)

Els únics inconvenients que presenta són:

- Visió limitada, doncs la llum solar no entra directament
- El sostre limita l'alçada dels *globus*, és a dir, llençar la pilota alta i bombejada

Com es pot observar, una pista coberta presenta molts avantatges en front a una pista a l'aire lliure. Els únics inconvenients que s'han esmenat, poden ser resolts amb facilitat. El primer, si la llum solar és limitada, s'instal·larà il·luminat artificial que, a més a més, permetrà utilitzar les pistes gairebé a totes hores durant tot l'any. El segon hi ha un estudi que determina l'alçada òptima [1].

## 4.2. Flux entorn de cossos

Una propietat fonamental dels fluids és la **viscositat**, entenent-se com la resistència que presenta quan s'aplica un esforç tallant. L'equació següent és la llei de la Viscositat de Newton. Aquesta governa el comportament de la majoria de fluids, classificant-se aquests com a fluids Newtonians.

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

eq. 4.1

Els fluxos externs al voltant d'un cos immers en una corrent fluida presenten efectes viscosos tallants per la condició de no lliscament a prop de les superfícies dels cossos, però són pràcticament no viscosos allunyats del cos. Per a estudiar el comportament d'un flux al voltant d'un cos cal entendre els conceptes que es desglossen en aquest capítol.

### 4.2.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos [5]

En tots els casos, el flux ha de satisfer les tres lleis de la conservació de la mecànica, una relació d'estat i les condicions inicials i de contorn apropiades:

- Conservació de la massa (continuïtat).
- Conservació de la quantitat de moviment (segona llei de Newton eq. 4.2).

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}(mV)$$

eq. 4.2



- Conservació de l'energia (primer principi de la termodinàmica eq. 4.3).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}_{sist}$$

eq. 4.3

- Una relació d'estat com  $\rho = \rho(p, T)$ .
- Condicions de contorn sobre superfícies sòlides, interfases, entrades i sortides.

Totes tres lleis parteixen una mateixa idea, el **teorema de Transport de Reynolds** (eq. 4.4), el qual relaciona la derivada temporal d'una propietat del sistema amb la variació d'aquesta propietat en un volum de control. Entenem per volum de control una regió específica de l'espai que el sistema pot ocupar en un instant determinat, amb independència del fet que el sistema s'hi mantingui o no.

$$\frac{d}{dt}(B_{sist}) = \frac{d}{dt} \left( \int_{CV} \beta \rho dV \right) + (\beta \rho AV)_{out} - (\beta \rho AV)_{in}$$

eq. 4.4

#### 1. Conservació de la massa

La conservació de la massa implica que  $\frac{dm}{dt} = 0$ . Fent referència al teorema de Transport de Reynolds (eq. 4.) per a un volum de control diferencial i en les tres direccions dels eixos de coordenades s'obté l'equació següent:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

eq. 4.5

Per a un flux estacionari es té que el terme  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  i, per tant, totes les propietats són únicament funció de la posició. A més a més, si el flux és incompressible, els canvis de densitat són negligibles, és a dir,  $\rho = constant$  i  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  i així doncs queda la següent equació.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

eq. 4.6

## 2. Conservació de la quantitat de moviment

Si s'aplica la segona equació de Newton (eq. 4.2) al moviment d'un flux dins d'un volum de control diferencial, s'obtenen les tres components de l'equació diferencial de la quantitat de moviment lineal. Per a fluids newtonians, les tensions viscoses són proporcionals a les velocitats de deformació de l'element fluid i al coeficient de viscositat,  $\mu$ . Aquestes equacions es coneixen com **a les equacions de Navier-Stokes**. Per a un flux incompressible amb densitat constant i viscositat, les equacions de Navier-Stokes són en cada direcció de l'espai:

$$\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \mu \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}$$

eq. 4.7

$$\rho g_y - \frac{dP}{dy} + \mu \left( \frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}$$

eq. 4.8

$$\rho g_z - \frac{dP}{dz} + \mu \left( \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} + \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}$$

eq. 4.9

## 3. Conservació de l'energia

Aplicant el teorema del transport de Reynolds a la primera llei de la termodinàmica (eq. 4.) amb un flux permanent i incompressible i considerant també un perfil de velocitats uniforme s'obté el que es coneix com **equació de Bernoulli** (eq. 4.0), que relaciona la pressió i la velocitat en una línia de corrent.

$$P + \gamma z + \frac{\rho v^2}{2g} = K$$

eq. 4.10

On  $P + \gamma z$  és la pressió estàtica,  $\frac{\rho v^2}{2g}$  és la pressió dinàmica i  $K$  és una constant.



## 4.2.2. Turbulència

Per a entendre el fenomen de la turbulència cal definir prèviament com determinar si un flux és turbulent o, pel contrari, laminar. Aquesta informació ens la dóna el nombre de Reynolds.

### 4.2.2.1. Nombre de Reynolds [6]

El nombre de Reynolds és adimensional i relaciona la densitat del flux, la velocitat  $u$ , i la seva viscositat amb la longitud característica  $L$  del problema d'estudi:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu}$$

eq. 4.11

La viscositat cinemàtica ve determinada per:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  en  $m^2/s$ , on  $\mu$  és la viscositat dinàmica.

El nombre de Reynolds es pot interpretar com la relació entre les forces inercials i les forces viscoses d'un fluid:

$$Re = \frac{\text{Forces inercials}}{\text{Forces viscoses}}$$

eq. 4.12

En un flux **laminar**, les capes del fluid llisquen una sobre l'altra de forma ordenada. Les forces viscoses associades al fluid són d'un ordre de magnitud major que les forces d'inèrcia, per tant, el nombre de Reynolds tindrà valors baixos. En els llibres més moderns i actuals, el límit per règim laminar en conductes s'accepta com  $Re < 3.500$ .

En canvi, pel que fa al flux **turbulent**, es desenvolupen fluctuacions irregulars del flux, és a dir, existeix un gran intercanvi de quantitat de moviment entre partícules del fluid. Dit d'una altra manera, és un flux inestable. Tot i que en aquest tipus de flux les forces d'inèrcia són predominants, les forces viscoses segueixen jugant un cert paper. Els valors del nombre de Reynolds pels quals apareix aquest tipus de flux s'estableixen entre  $5.000 < Re < 10^5$ .

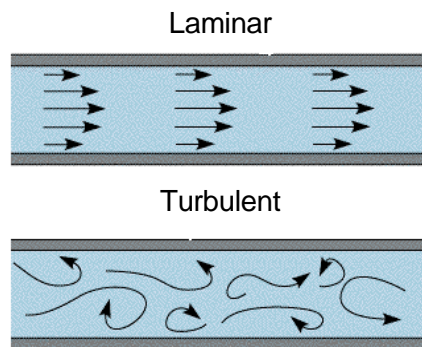


Figura 4.2 Representació flux laminar i turbulent 0

Per a valors de nombre de Reynolds compresos entre  $3.500 < Re < 5.000$  per flux en conductes, el flux es considera **transitori**, les forces inercials i viscoses són d'un mateix ordre de magnitud. En aquest tram és impossible determinar amb precisió les característiques associades al flux com esforços tallants, a causa del caràcter inestable del propi fluid. No existeix repetibilitat en la realització de mesures.

#### 4.2.2.2. Definició de la turbulència

L'acció del vent (aire) és indiscutiblement aleatòria i subjecte a la turbulència. Malgrat no existir una definició precisa de turbulència, l'essència del concepte resideix en tot un seguit de característiques que s'exposen a continuació:

- Tot flux turbulent és **irregular**, caòtic. Això en dificulta una descripció determinista, donat que tota mesura de qualsevol magnitud física comporta fluctuacions aleatòries en l'espai i el temps.
- Presenta un efecte de mescla, o **difusivitat**, que produeix un increment de les velocitats de transferència, quantitat de moviment, calor i matèria, entre d'altres.
- És rotacional i tridimensional atès que es caracteritza per alts nivells de **fluctuació de vorticitat**. Entenem vorticitat com a la magnitud física que quantifica la rotació d'un fluid.
- Un flux viscos és **dissipatiu** a causa de l'acció dels esforços viscosos. És necessària una aportació continuada d'energia.
- Els fluxos turbulents sempre s'esdevenen a **Re elevats**. La turbulència sempre s'origina arrel d'inestabilitats en fluxos laminars quan Re comença a ser gran.
- La turbulència és un fenomen **continu**, atès que fins i tot les escales més petites que poden distingir-se en un flux turbulent són molt majors que qualsevol escala de longitud molecular.

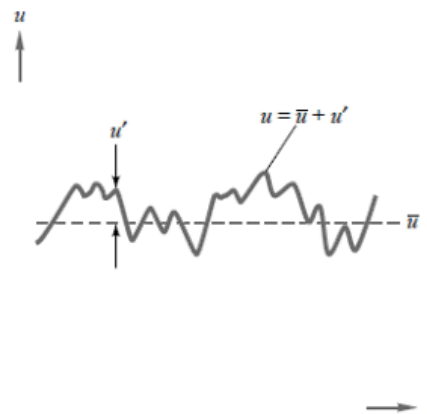




Una manera de definir quantitativament la turbulència és mitjançant les fluctuacions de les magnituds que caracteritzen al fluid, per exemple la velocitat (tot i que pot ser per a qualsevol altre magnitud) [8]. Sigui  $u$  la velocitat qualsevol del fluid es pot representar com a la suma del seu valor mig  $\bar{u}$  i una component de fluctuació  $u'$ , tal com es representa en la *Figura 4.1*.

$$u = \bar{u} + u'$$

eq. 4.13



*Figura 4.1* Fluctuació de la velocitat de la turbulència

Si es substitueix aquesta expressió (eq. 4.13) en les equacions de continuïtat i les de Navier-Stokes s'obté:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

eq. 4.14

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right)$$

eq. 4.15

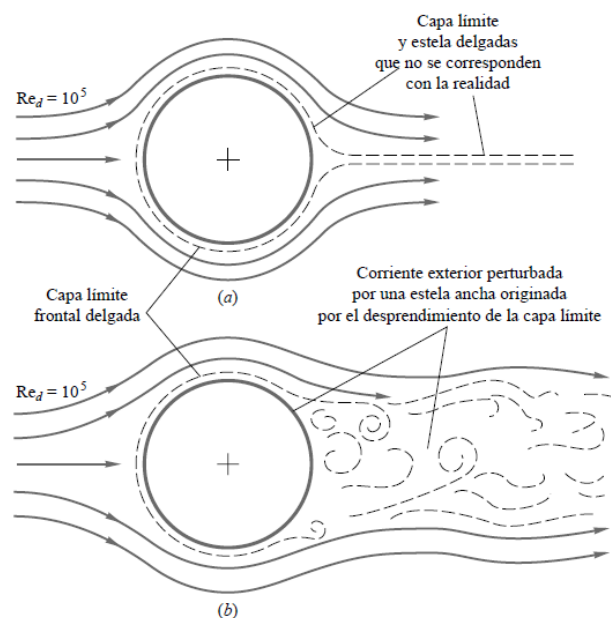
On  $-\rho \overline{u'^2}$  i  $-\rho \overline{u'w'}$  són negligibles i  $-\rho \overline{u'v'}$  són els esforços turbulents deguts a les fluctuacions. Per tant, en un flux turbulent els esforços tangencials tenen dues components, una laminar deguda a la viscositat i una turbulenta deguda a les fluctuacions de les velocitats, tal com es pot veure en l'**Error! Reference source not found.6**. Per modelar les tensions turbulentes, es pot utilitzar el concepte de viscositat turbulenta (o de remolí) que fou introduït per *Boussinesq*.

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \tau_{\text{laminar}} + \tau_{\text{turbulenta}}$$

eq. 4.16

### 4.2.3. Capa límit

En un cas idealitzat i amb un fluid no viscos, el flux al voltant d'un cos cilíndric seria tal i com es mostra a la *Figura 4.3(a)*, on les línies de corrent contornegen l'objecte resseguint la seva geometria. No obstant, els fluxos reals són viscosos i presenten fenòmens de transport, com la difusió de massa, viscositat (fricció) i conducció tèrmica. Aquesta viscositat que presenten els fluxos reals infereix en al capacitat que té un fluid en resseguir el contorn d'un cos. Com a conseqüència el flux real al voltant del cos cilíndric seria el de la *Figura 4.3(b)*.



*Figura 4.3* Il·lustració del flux al voltant d'un cos cilíndric: (a) flux ideal no real; (b) flux real

El frec intern que apareix entre fluid i sòlid s'explica mitjançant la condició de no lliscament. No hi ha desplaçament entre fluids i sòlids en contacte i, per tant, tota partícula d'un fluid en contacte amb un sòlid té sempre la velocitat d'aquest sòlid.

La resta de capes més allunyades del fluid es veuen també afectades pel frec intern, a causa de la viscositat de tot el fluid. Aquestes capes disminueixen la seva velocitat de forma proporcional a la distància a la que es troben de l'objecte. Arriba un punt on les capes del fluid

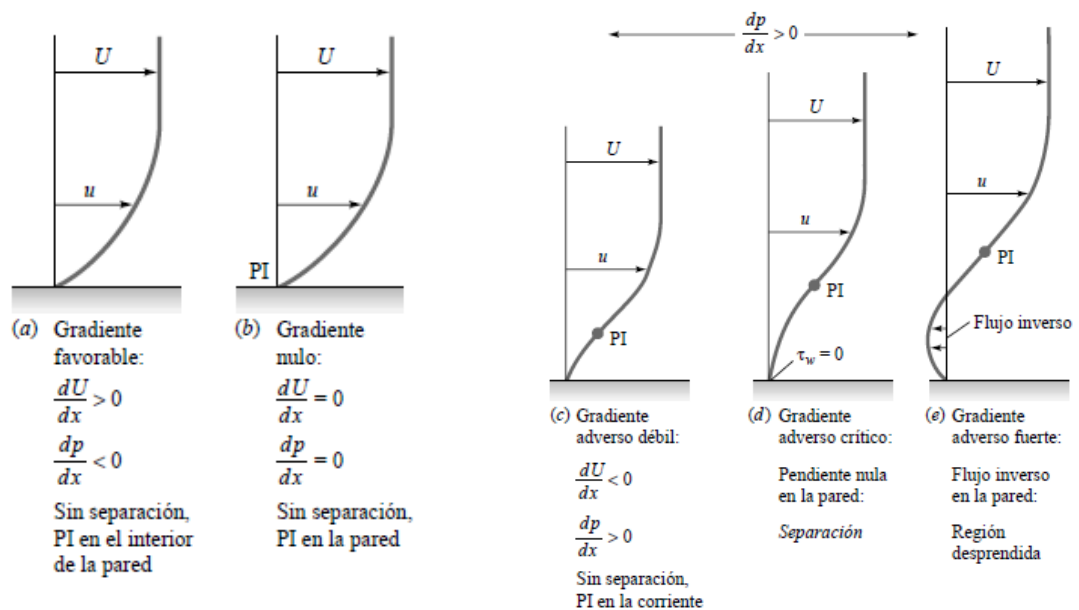


ja no es veuen afectades per la capa interna. A partir d'aquest, trobem el que s'anomena **flux potencial** o no viscos.

La zona més propera a la superfície del cos, on el fluid es veu alterat per la condició de no lliscament amb el sòlid es coneix com a **capa límit**. Considerem com a capa límit la zona en la que el fluid està en contacte amb el sòlid fins que assoleix el 99% de la velocitat del flux potencial.

El **despreniment de la capa límit** es deu a una pèrdua de la quantitat de moviment del fluid proper a la superfície del cos, tal com va demostrar Prandtl. És a dir, es produeix despreniment quan el fluid es mou sota un gradient advers de pressions,  $\frac{dp}{dx} > 0$ . Quan la pressió disminueix,  $\frac{dp}{dx} < 0$ , es diu que hi ha un gradient favorable i, en aquestes condicions, no es presenta mai la separació de la capa límit. En la corrent sobre un cos submergit, per exemple el de la *Figura 4.3(b)*, el gradient favorable es presenta a la part frontal del cos i l'advers a la part posterior.

En la *Figura 4.4* s'il·lustra el cas general. Amb un gradient favorable (*Figura 4.4(a)*), el perfil es convex, no hi ha punt d'inflexió i no hi ha separació. Els perfils laminars d'aquest tipus són molt resistents a la transició a la turbulència. Amb gradient de pressió nul (*Figura 4.4(b)*), el punt d'inflexió (PI) està en la pròpia paret del cos. No hi ha separació i el flux es fa turbulent.



*Figura 4.4* Efecte del gradient de pressió en el perfil de velocitats a la capa límit

Si el gradient de pressió es advers (*figures 4.4(c)(d)(e)*), el punt d'inflexió està a la capa límit a una distància de la paret que augmenta amb la intensitat del gradient advers. Per a un gradient advers dèbil (*Figura 4.4(c)*), el flux encara no es desprèn.. Amb un gradient advers moderat s'assoleix una situació crítica (*Figura 4.4(d)*), on l'esforç tallant a la paret és nul. Això

defineix el punt de separació ( $= 0$ ), ja que qualsevol gradient més fort produirà una corrent de recirculació a la paret (*Figura 4.4(c)*): el gruix de la capa límit creix considerablement i la corrent principal es desprèn o es separa de la paret (*Figura 4.3(b)*).

En desprendre's la capa límit, es forma una zona de depressió que rep el nom de **deixant** o **estela**. El deixant és una zona de pressions baixes, la qual es caracteritza per augmentar la resistència a l'avanç i reduir les forces de sustentació.

#### 4.2.4. Forces d'un fluid al voltant d'un cos

Quan un cos de forma arbitrària es submergeix en una corrent fluida, el fluid exerceix sobre ell forces i moments. En la direcció paral·lela a la corrent no pertorbada la força sobre el cos i positiva en sentit cap a on circula el fluid es denomina força de **resistència a l'avanç** o *drag*. Perpendicularment aquesta i en la direcció perpendicular a la corrent no pertorbada, hi ha la força de **sustentació** o *lift*. Cada una d'aquestes dues forces té un coeficient adimensional associat. Aquests són el **coeficient de resistència a l'avanç** o *drag coefficient* ( $C_D$ ) i el **coeficient de sustentació** o *lift coefficient* ( $C_L$ ).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_p} ; \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_p}$$

eq. 4.17

On  $A_p$  és l'àrea projectada.

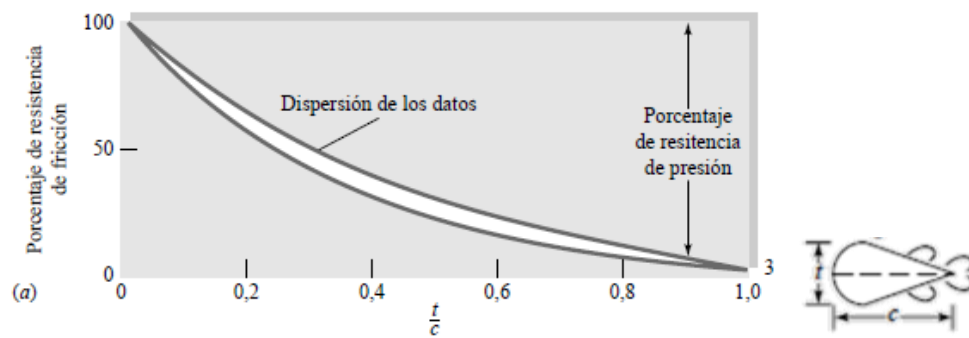
El coeficient de resistència a l'avanç es pot dividir en dos components, per una banda el **coeficient degut a les pressions**, que determina la resistència generada per la diferència de pressions entre les diferents superfícies del cos. Per altre banda, el **coeficient degut a les friccions** que determina l'esforç aplicat tangencialment a la paret de la superfície del cos.

$$C_D = C_{D,press} + C_{D,fricc}$$

eq. 4.18

La contribució de cada coeficient depèn en gran mesura de la forma del cos, especialment del seu gruix o, si es tracta d'una coberta, de la fletxa de l'arc. Al *Gràfic 4.1* es mostra quina és l'aportació de cada component al coeficient total de resistència a l'avanç segons la geometria del cos. Quan existeix un gruix  $t$  molt petit, la repercussió del coeficient de resistència a l'avanç per fricció és propera al 100%. En canvi, quan el gruix  $t$  és igual a la corda  $c$ , el coeficient degut a la fricció representa només un 3% del coeficient de resistència a l'avanç total.





Gràfic 4.1 Aportació percentual al coeficient de resistència a l'avanç en funció de la geometria 0

### 4.3. Definició del model numèric

En aquest capítol es presenta una breu justificació del perquè de l'ús d'eines CFD per a les simulacions d'aquest projecte. A més a més, s'expliquen els primers passos necessaris per a tota simulació, és a dir, el procés de disseny de la geometria, del domini i del mallat. També es detallen les condicions de contorn aplicades sobre el domini i les equacions resoltes pel programa per a determinar la solució.

#### 4.3.1. Introducció de CFD

L'estat físic de qualsevol fluid (gas o líquid) està governat pels tres principis fonamentals de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia. La Dinàmica de Fluids Computacional, coneguda com CFD per les sigles en anglès, és el conjunt de tècniques que permeten resoldre les equacions que deriven dels tres principis anteriors, mitjançant els quals s'obtenen els camps de velocitat, temperatura i pressió en el fluid estudiat [9].

La CFD treballa dividint el domini d'interès en una sèrie de petits volums discrets mitjançant una malla. Les propietats físiques del fluid, tals com la temperatura o la velocitat, són calculades en cadascun d'aquests volums com solució de les equacions fonamentals.

Els avantatges de la CFD són:

- Prediu les propietats del fluid amb detall en el domini estudiat.
- Ajuda al disseny i al prototipatge, obtenint solucions ràpides evitant experiments cars.
- S'obté una visualització i animació del procés en termes de les variables del fluid.

Els inconvenients de la CFD són:

- Es necessiten usuaris amb ampla experiència i formació especialitzada.

- Consumeix recursos de hardware i software que requereixen inversions significatives.
- En alguns casos, el cost computacional és elevat.

#### 4.3.2. Metodologia

Per a realitzar l'anàlisi CFD d'aquest projecte s'utilitzarà el programa de càlcul numèric *CFX* de la plataforma *Ansys Workbench*. Ansys CFX és un software d'alt rendiment, que permet trobar solucions fiables i precises de forma ràpida i robusta. A més a més, avarca una abundant selecció de models físics per a capturar pràcticament qualsevol tipus de fenomen relacionat amb el flux de fluids 0.

#### 4.3.3. Equacions resoltes pel programa

Els programaris de simulació resolen les equacions fonamentals en forma diferencial sobre dominis fluids dividits en elements o volums finits, és a dir, calculen la solució per als nodes definits en el mallat de forma iterativa fins que la solució convergeix. En aquest cas s'utilitzen dues equacions principalment que són: l'equació diferencial de conservació de la massa i l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Ambdues referents a un flux estacionari, incompressible i newtonià. A més a més, cal fer una bona definició del model de turbulència emprat.

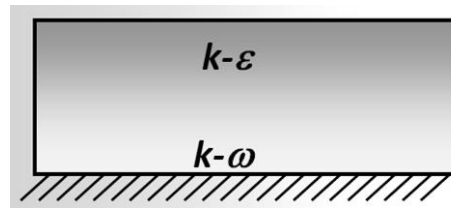
Per modelar els esforços turbulents la idea resideix en el fet que si un flux turbulent es caracteritza per la difusivitat i la dissipació, aleshores es pot assumir un mecanisme similar al de la difusió i dissipació del flux laminar. Així el problema es pot reduir a modelar el que es coneix com la **viscositat turbulenta**  $\mu_T$  introduïda per Bousinesq.

El model matemàtic [8] que s'ha utilitzat per al càlcul del flux turbulent del nostre cas és el RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) que consisteix en resoldre les equacions promitjades en funció de les fluctuacions instantànies de totes les propietats on es esforços turbulents queden en funció de la viscositat turbulenta. Per calcular la  $\mu_T$ , sovint és imprescindible l'ús de models de *tensor de Reynolds*, consistents en l'estimació directa d'aquest terme sense passar per la hipòtesi de Boussinesq. El model *Eddy Viscosity Model* n'és un exemple.

En aquest projecte s'utilitza el model de turbulència de SST o **Shear Stress Transport**. Aquest model és la combinació de dos models ja existents: el **k- $\epsilon$**  i el **k- $\omega$** . Tots tres són models Eddy-viscosity. El model k- $\omega$  calcula amb més precisió els efectes propers a la paret o superfície de l'objecte d'estudi, en canvi, el k- $\epsilon$  modela millor les propietats lluny de la paret. . El model SST utilitza el millor de cadascun dels dos anteriors en funció de la distància a la

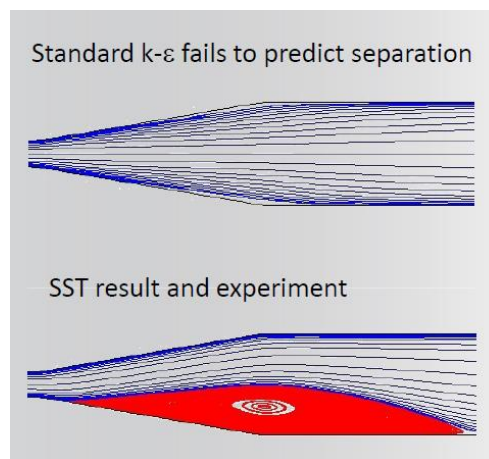


paret (*Figura 4.5*).



*Figura 4.5* Model emprat pel SST en funció de la distància a la paret

Com a resultat, el model SST calcula amb molta precisió la separació de la capa límit degut a gradients de pressió adversos. Això és fonamental per aquest projecte doncs, tal i com es veurà en quasi tots els casos simulats, que hi haurà separació de la capa límit sobre la coberta (*Figura 4.6*) i formació de deixants de grans dimensions.



*Figura 4.6* Simulació despreniment capa límit segons models  $k-\epsilon$  i SST

Tot i que el model emprat simula molt bé la zona a prop de les parets de la capa límit és molt important comprovar que s'ha fet una bona definició dels elements a les capes més properes a la coberta.

L'opció *wall functions* permet inferir el perfil de velocitats que hi ha proper a la paret sense la necessitat d'utilitzar la Llei Universal de la paret per a la turbulència (*Figura 4*). Amb aquesta opció, no es necessari un refinat molt elevat en la zona de la capa límit. El model SST utilitza aquesta opció.

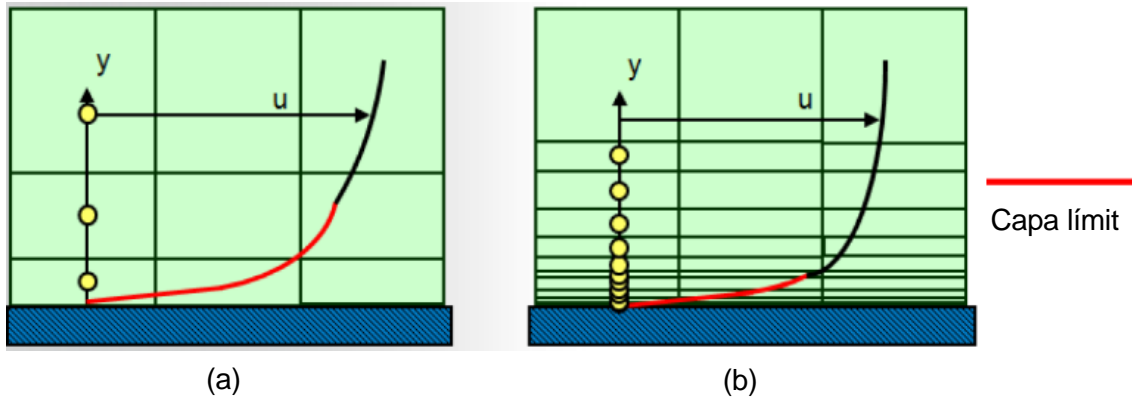


Figura 4.7 Perfil de velocitats a la capa límit:  
(a) sense wall function i (b) amb wall function

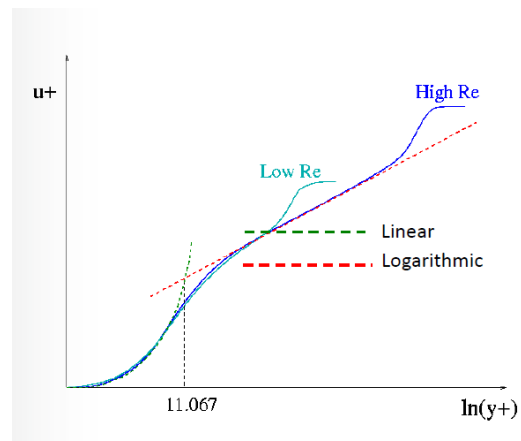
El Gràfic 4.2 mostra la velocitat adimensional,  $u^+$  (eq. 4.19) en funció de la distància des de la paret adimensional,  $y^+$  o **Yplus** (eq. ). S'observa que a prop de la paret la velocitat canvia ràpidament.

$$u^+ = \frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_{paret}}{\rho}}}$$

eq. 4.19

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\frac{\tau_{paret}}{\rho}}}{\nu}$$

eq. 4.20



Gràfic 4.2 Velocitat en funció de la distància des de la paret

Per a comprovar el nivell de refinament de malla dins de la capa límit es pot representar el valor de la  $y^+$  que ens indica la distància a la paret del primer vèrtex de l'element adjacent a la mateixa. Normalment, quan s'utilitza la opció wall functions, el  $y^+$  es recomana que com a mínim es trobi entre 20 i 200.

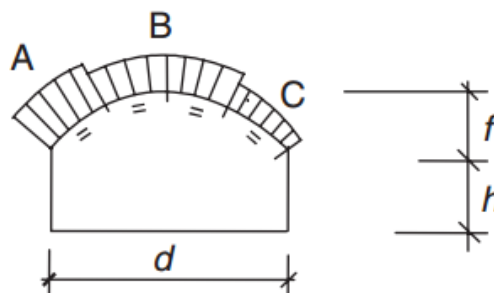




## 5. Normatives sobre accions del vent en estructures

Per a poder fer una bona comparativa entre els resultats obtinguts en aquest estudi i la normativa, cal fer una bona interpretació d'aquesta. Es considera que els resultats de la normativa són fortament fiables, ja que les dades que hi apareixen provenen d'un gran nombre d'assajos experimentals.

Seguint la normativa [12][13], la coberta es divideix en 3 trams i s'obté el valor de la pressió en cadascun d'ells. En la *Figura 5.1* es pot observar la divisió de la coberta en els trams A, B i C i, a més a més, les dimensions que defineixen l'alçada màxima de la coberta ( $Z = f + h$ ).



*Figura 5.1* Vista en alçat de la coberta

En la normativa, la pressió es determina en funció de dues components de la velocitat: el valor mig i la fluctuació. La primera es troba calculant la velocitat bàsica del vent, definida per l'expressió següent:

$$V_b = C_{direcció} \cdot C_{estació} \cdot V_{b,0}$$

eq. 5.1

Per conveni, aquesta velocitat està calculada en la categoria de terreny II, la qual correspon a una zona amb vegetació poc abundant, sense gaire obstacles i a 10 m del terra. Els coeficients que acompanyen a la velocitat del vent ( $V_{b,0}$ ) estan estipulats per l'annex nacional [11], però es recomana que prenguin valor 1.

Un cop determinada la velocitat bàsica del vent, es pot obtenir la velocitat mitjana amb l'eq. 5.2. Aquesta depèn de l'alçada de la coberta i de la rugositat i orografia del terreny.

$$V_m(z) = C_0(z) \cdot C_r(z) \cdot V_b$$

eq. 5.2

Seguint la normativa europea, el factor  $C_0$  pren valor 1 perquè la coberta es troba en un terreny sense penya-segats, valls ni muntanyes. El factor  $C_r$  depèn de la rugositat del terreny i de l'alçada de la zona d'estudi respecte el terra. De la *Taula 5.1* s'obtenen dos paràmetres,  $Z_0$  i  $Z_{min}$ , els quals depenen de les característiques del terreny.

Terrain category		$Z_0$ m	$Z_{min}$ m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10
NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.			

*Taula 5.1. Categories i paràmetres del terreny*

Amb aquests paràmetres es pot determinar quina equació de les següents s'ha d'utilitzar per a trobar el coeficient  $C_r$ .

$$C_r(z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ si } Z_{min} < Z < Z_{max}$$

eq. 5.3

$$C_r(z) = C_r(Z_{min}), \text{ si } Z < Z_{min}$$

eq. 5.4

Amb tot això, si l'equació requerida és l'eq. 5.3, caldrà determinar el valor de  $K_r$ .

$$K_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}$$

eq. 5.5

On el coeficient  $z_{0,II}$  correspon al valor de la categoria de terreny II i  $z_0$ , al valor d'estudi.



Per altra banda, un coeficient que pren molta importància és la intensitat turbulenta ( $I_v$ ). També s'ha de determinar, en funció dels paràmetres de la *Taula 5.1*, quina de les equacions s'ha d'utilitzar.

$$I_v = \frac{\alpha_v}{V_m(z)} = \frac{K_l}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \text{ si } Z_{min} < Z < Z_{max}$$

eq. 5.6

$$I_v = I_v(Z_{min}), \text{ si } Z < Z_{min}$$

eq. 5.7

Si l'equació requerida és l'eq. 5.6, caldrà determinar el valor de la desviació turbulenta,  $\alpha_v$ , que ve determinada per l'equació 5.8.

$$\alpha_v = K_r \cdot V_b \cdot K_l$$

eq. 5.8

On coneixem els valors dels paràmetres excepte de  $K_l$ , que segons la normativa europea, pren el valor de 1.

Finalment, es calcula la pressió de la velocitat composta per una velocitat mitjana i una fluctuació. Aquest valor s'anomena pressió de la velocitat de pic,  $q_p(z)$ , i és funció de l'alçada de la coberta.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2$$

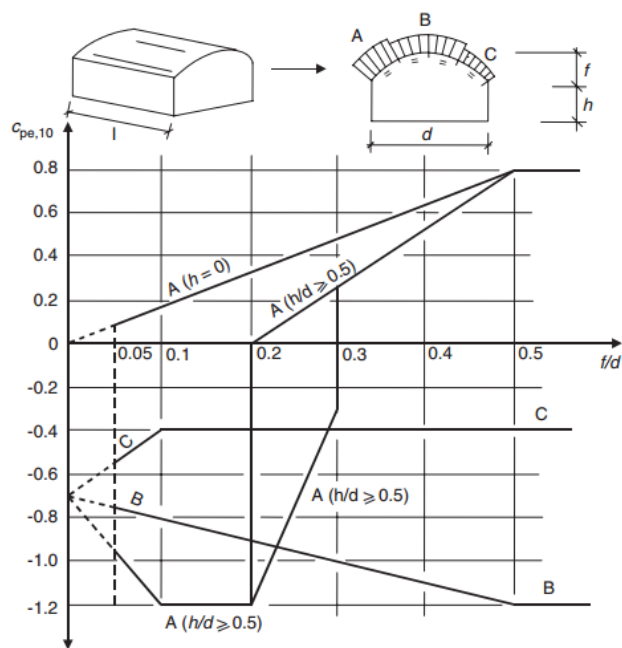
eq. 5.9

L'equació 5.10 proporciona el valor de la pressió sobre la coberta i, per tant, serveix per corroborar o desestimar els resultats obtinguts mitjançant la simulació numèrica.

$$W_e = q_p(Z_e) \cdot C_{pe}$$

eq. 5.10

On  $C_{pe}$  és el coeficient de pressió extern i depèn de la geometria de la construcció. Del *Gràfic 5.1* s'obté el valor d'aquest coeficient per a cadascun dels tres trams amb els que s'ha dividit la coberta d'estudi.



Gràfic 5.1 Cpe en funció del tram d'estudi



## 6. Domini computacional 3D

### 6.1. Consideracions prèvies

Prèviament a aquest projecte es va fer un estudi amb un model més simple i amb un domini en 2D [1]. En aquest projecte anterior, es va validar el model numèric per dur a terme les simulacions. A més a més, es van definir les dimensions geomètriques de la coberta: la corda de l'arc  $d$  (*Figura 5.1*) es va fixar d'acord amb l'estàndard d'aquest tipus de sostres per a pistes de pàdel (13 m), l'alçada de la coberta  $h$  pren el valor de 7 m i la fletxa de l'arc  $f$  es va dimensionar de 1,6 m perquè presenta la curvatura més òptima.

Una de les mancances de l'estudi en 2D és el fet de no permetre analitzar diferents orientacions del vent a causa de la senzillesa del domini estudiat, fet que era necessari per a poder comprar els valors amb la normativa.

A més a més, l'estudi previ ha servit també per a adquirir una base de coneixements necessaris per a la realització d'aquest projecte, com ara l'agilitat i l'experiència per a utilitzar programari com el *CFX* de forma correcta i eficient.

Per tant en el present treball es presenten resultats obtinguts amb un model tridimensional (3D).

### 6.2. Geometria i domini computacional

El primer pas de tota simulació és la creació de la geometria. Aquesta consisteix en definir l'àrea que envolta el perfil del cos, per a poder estudiar quins efectes provoca la coberta sobre el flux del fluid extern incident sobre ella (aire, vent). Aquesta superfície s'anomena domini i tot element objecte d'estudi s'ha de trobar al seu interior. Per al disseny de la geometria, s'utilitzen programes CAD, com ara *SolidWorks* o *PTC Creo Elements*, i després s'importen al *Workbench* de l'ANSYS CFX. Tot i això, el propi ANSYS incorpora un subprograma per a modelar geometries que no s'ha utilitzat.

En aquest estudi el disseny es va fer amb *SolidWorks*. Les dimensions que té la coberta i el domini d'estudi són les de la *Figura 6.1* i la *Figura 6.2*.

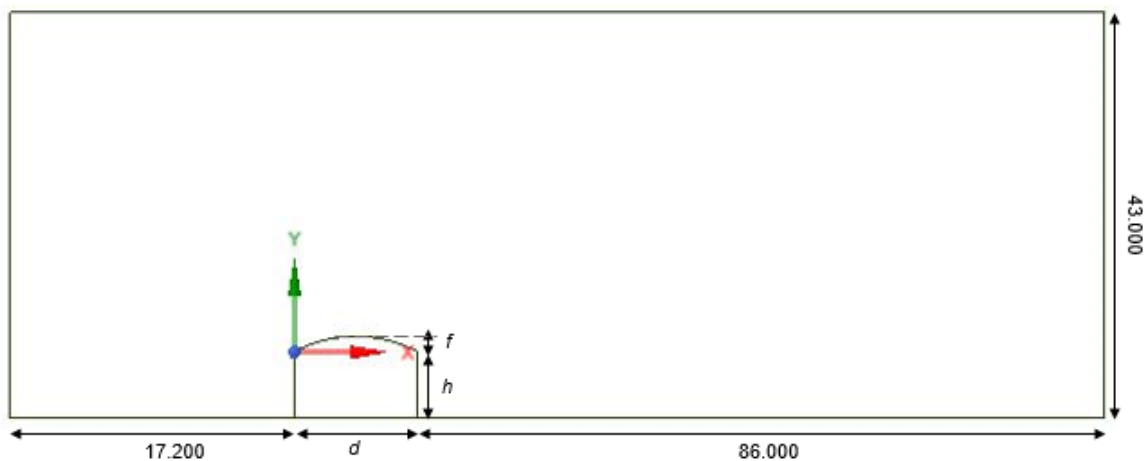


Figura 6.1 Plànol en alçat geometria domini

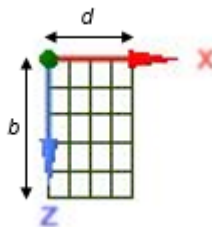


Figura 6.2 Plànol en planta geometria coberta

La coberta està centrada en el domini i té una llargada  $b$ . En aquest projecte, com s'ha comentat anteriorment, s'estudiarà l'efecte d'aquesta variable en les accions fluidodinàmiques. En la coberta base, el valor de  $l$  és de 22 m i en la curta és de 13,2 m.

Per a garantir un mallat més fi a les parets properes a la geometria d'estudi, s'han creat dos dominis computacionals. Un d'ells és el domini d'estudi ja definit, l'altre, el més petit, s'utilitza com a *Body of Influence* alhora de fer el mallat (Figura 6.3). Utilitzar un cos com a body of influence permet forçar un refinament de la malla en una zona determinada.



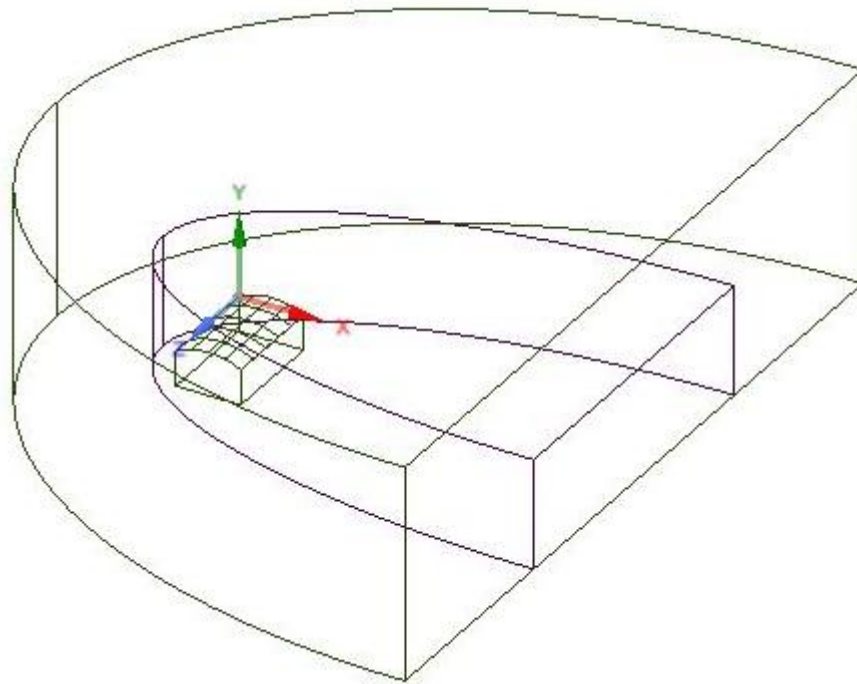


Figura 6.3 Geometria tridimensional completa de l'estudi

### 6.3. Condicions de contorn

En un altre estudi previ [14], es va fer una comparativa entre els valors obtinguts en les simulacions i els valors presents en la normativa europea, utilitzant un domini en 2D.

Una de les conclusions obtingudes és que s'obtenen millors resultats modificant la condició de contorn de l'*Inlet*, és a dir, les característiques i propietats del vent incident a la coberta per tenir en compte el perfil de velocitats i la turbulència. Per tant, aquest es defineix tenint en compte els següents punts:

- Nivell de turbulència del flux d'entrada del 19%.
- Perfil de velocitats no uniforme, seguint l'eq. 6.1. A la Figura 6.4 és representa de manera gràfica.

$$if \left( y < 2[m], 20.32 [m/s], 5.52 \cdot \ln \left( \frac{y}{0.05} [m] \right) [m/s] \right)$$

eq. 6.1

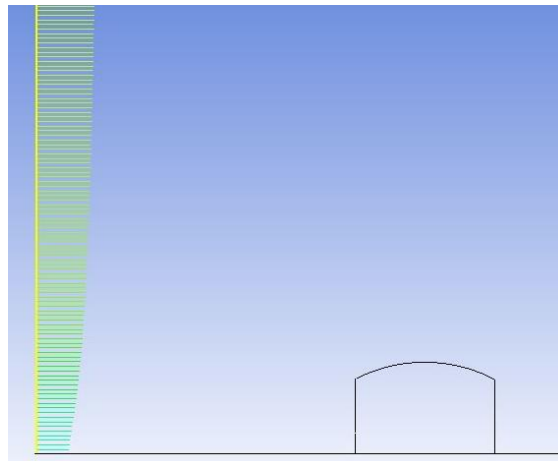


Figura 6.4 Perfil de velocitats del inlet

Les condicions de contorn s'apliquen al domini d'estudi tal com es pot veure a la *Figura 6.5*. Les zones d'entrada i sortida del flux són l'*Inlet* i l'*Outlet* respectivament. La pressió a la sortida és l'atmosfèrica. La condició *Wall* s'aplica a les cares laterals de la coberta i al *Ground*. També a la paret frontal, la posterior i les que conformen el sostre de la coberta sota el nom de *Roof*. A més a més, s'ha aplicat la condició de simetria, *Symmetry*, a la superfície superior del domini.

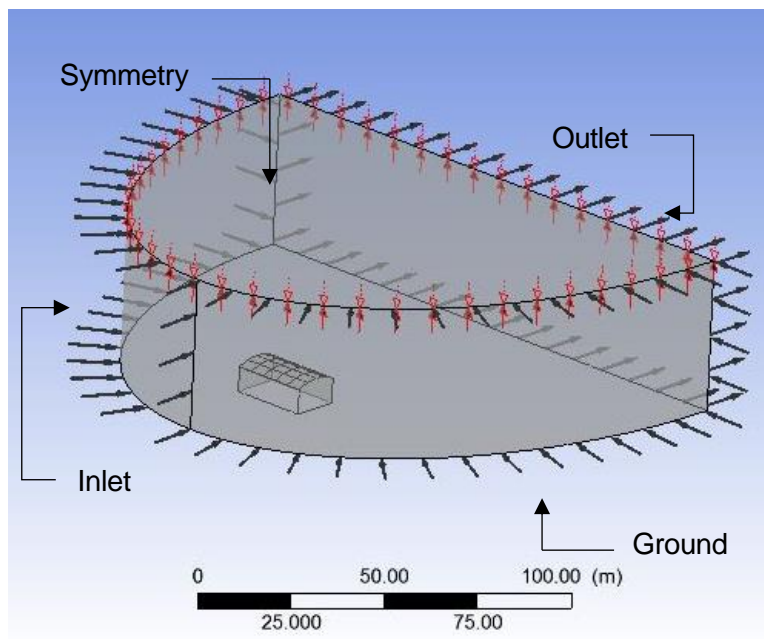


Figura 6.1 Condicions de contorn aplicades al domini

Finalment, s'estableixen els paràmetres que es volen monitoritzar durant el càlcul i estudiar el





seus valors. Aquests són els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació, definits a l'Ansys amb les següents expressions respectivament:

$$force\_x()@Roof * 2 / ( massFlowAve(Density)@Inlet * (massFlowAve(Velocity)@Inlet)^2 * 13[m] * 0.2[m] )$$

$$force\_y()@Roof * 2 / ( massFlowAve(Density)@Inlet * (massFlowAve(Velocity)@Inlet)^2 * 13[m] * 0.2[m] )$$

on:

*force\_x()@Roof* és la força aplicada sobre la superfície del perfil en direcció x.

*force\_y()@Roof* és la força aplicada sobre la superfície del perfil en direcció y.

*massFlowAve(Density)@Inlet* és la densitat de l'aire que incideix sobre el domini.

*massFlowAve(Velocity)@Inlet* és la velocitat de l'aire que incideix sobre el domini.

*13[m] \* 0.2[m]* és l'àrea en planta (Ap) en m<sup>2</sup>.

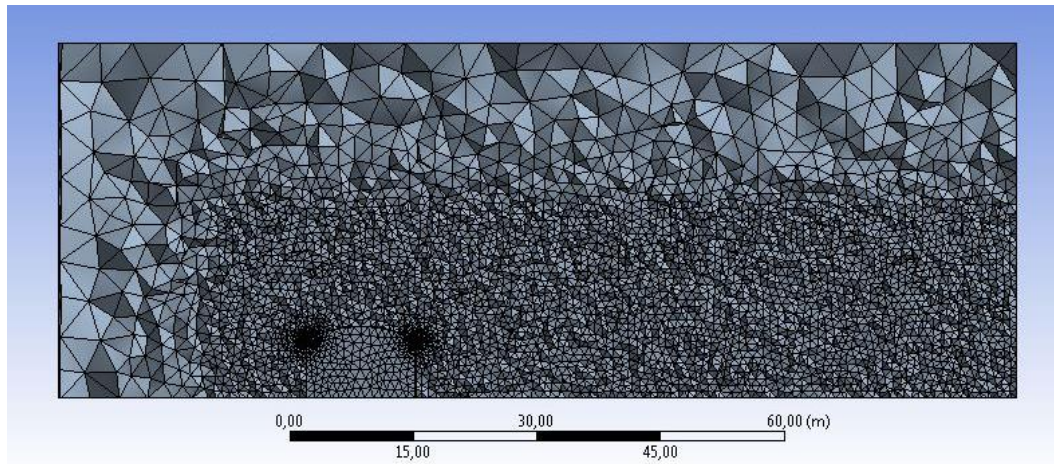
L'últim pas abans d'iniciar la simulació és fixar el nombre d'iteracions que resoldrà la computadora. Per aquest projecte està comprés entre un mínim de 100 iteracions i un màxim de 200.

## 6.4. Sensibilitat de la malla

Un cop definida la geometria, cal definir el mallat pel domini de l'estudi. És el pas més crític, doncs els resultats depenen en gran part de la qualitat de la malla que s'hagi implementat. Una malla amb elements grans donarà resultats poc acurats i, per tant, errors importants. En canvi, una malla amb elements més petits proporcionarà una solució més precisa, a canvi d'un temps de càlcul molt més gran. Cal tenir present que, amb una malla molt fina hi poden haver problemes de convergència del resultat i no arribar-se a obtenir una solució.

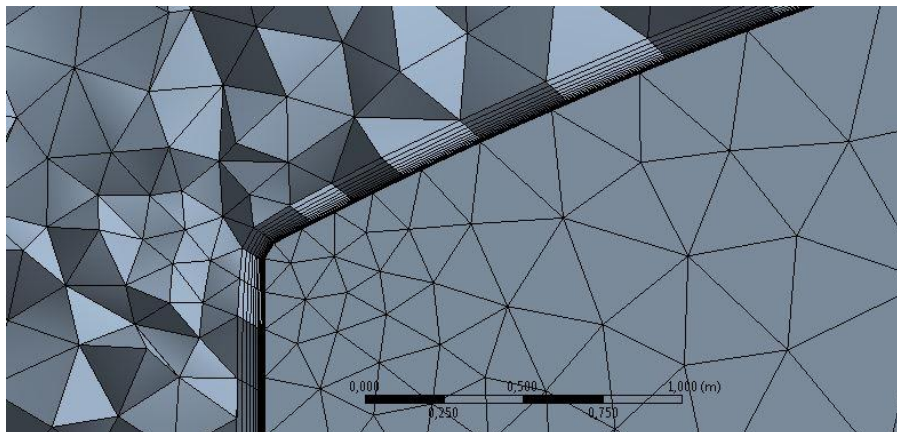
La dificultat del procés de mallat resideix en trobar la malla òptima, amb el menor nombre d'elements, que permeti obtenir resultats precisos. Per aconseguir això, s'apliquen els següents mètodes de mallat sobre el domini:

- *Body sizing* utilitzant un *body of influence* que permet forçar les dimensions dels elements en les zones més rellevants, és a dir, al voltant de la coberta i la zona corresponent al deixant, on s'ha de fer un refinat més acurat.



*Figura 6.6 Domini mallat*

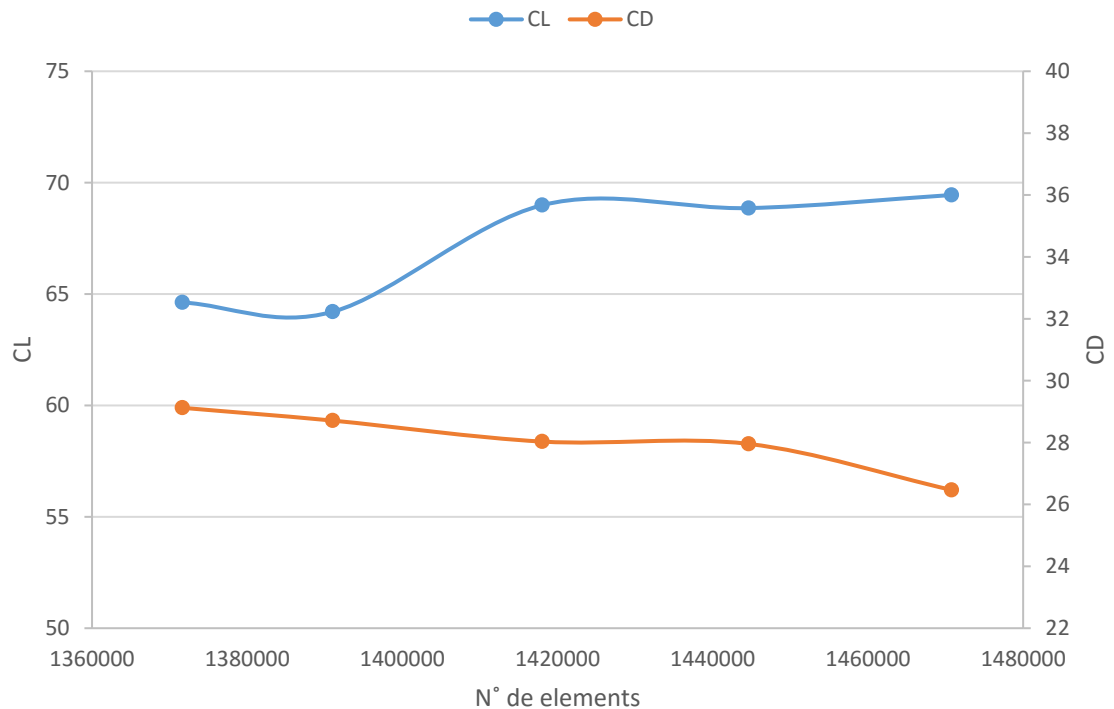
- *Inflation* a totes les cares de la coberta. Això consisteix en afegir elements molt petits en la zona de la capa límit propera a la paret i així poder calcular amb més precisió les tensions viscoses i el comportament de la capa límit.



*Figura 6.7 Detall del Inflation*

Un cop establertes aquestes condicions, es prossegueix a fer un estudi per a identificar la malla òptima en quant a elements. Aquest es fa calibrant les característiques del Inflation (nombre de capes i gruix de la primera capa) de forma seqüencial. Es parteix d'una malla de grans elements i es va refinant fins a obtenir resultats invariables dels coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació. A continuació es mostra el *Gràfic 6.1* on es s'aprecia l'influència del tipus de malla sobre els resultats, fent un gràfic dels coeficients mencionats en funció del nombre d'elements de la malla.





Gràfic 6.1 Coeficient de resistència a l'avanç i de sustentació en funció del nombre d'elements de la malla

Es pot observar que a partir del 1.420.000 elements no hi ha millora en la precisió dels resultats. Per tant, la malla seleccionada consta de 1.418.025 elements.

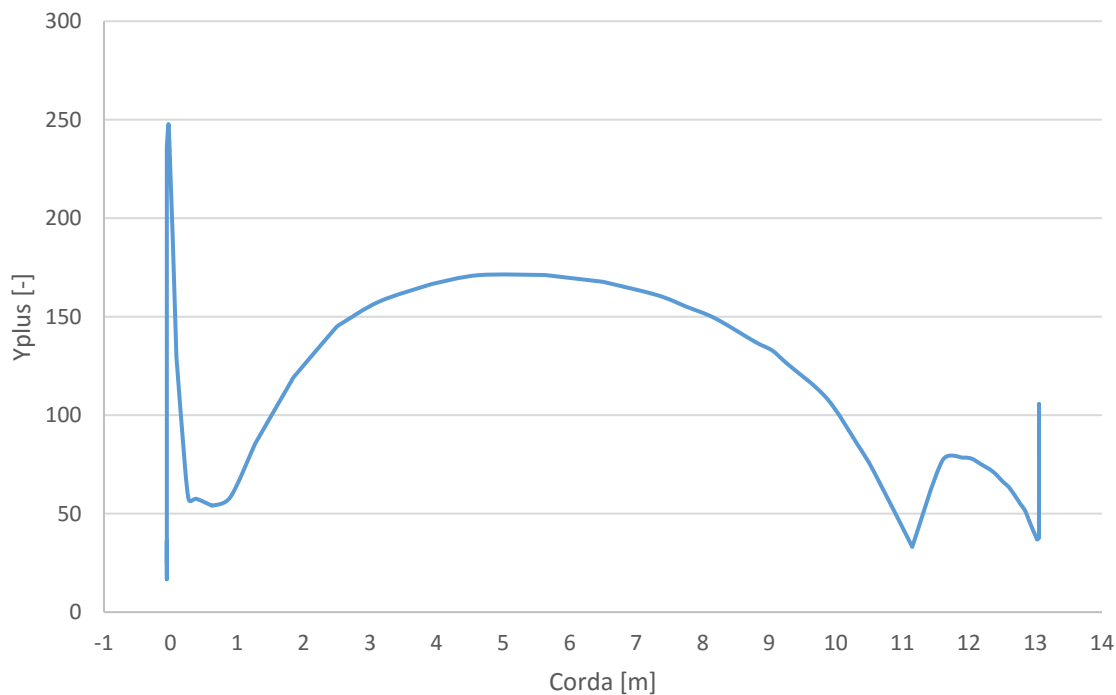
## 6.5. Models de simulació

És important i de gran ajuda entendre com soluciona el problema el programari CFX. Per aquest motiu, en aquest apartat s'expliquen totes les equacions, balanços, aproximacions, etc, que resol l'Ansys per arribar a la solució final.

Primerament es fixen el tipus de fluid (aire) i la pressió de referència (atmosfèrica). També s'escull un model de simulació sense transferència de calor (isoterm) i amb turbulència (*Shear Stress Transport*).

### 6.5.1. Turbulència a prop les parets

És molt important comprovar que s'ha fet un bon mallat i un bon refinat a les capes més properes a la superfície. Al Gràfic 6.2 s'observen els valors de  $y^+$  en funció de la corda. Com aquests es troben dins dels límits establerts, es corrobora que el mallat és correcte pel model de turbulència que es vol emprar i, per tant, la capa límit es resol correctament.

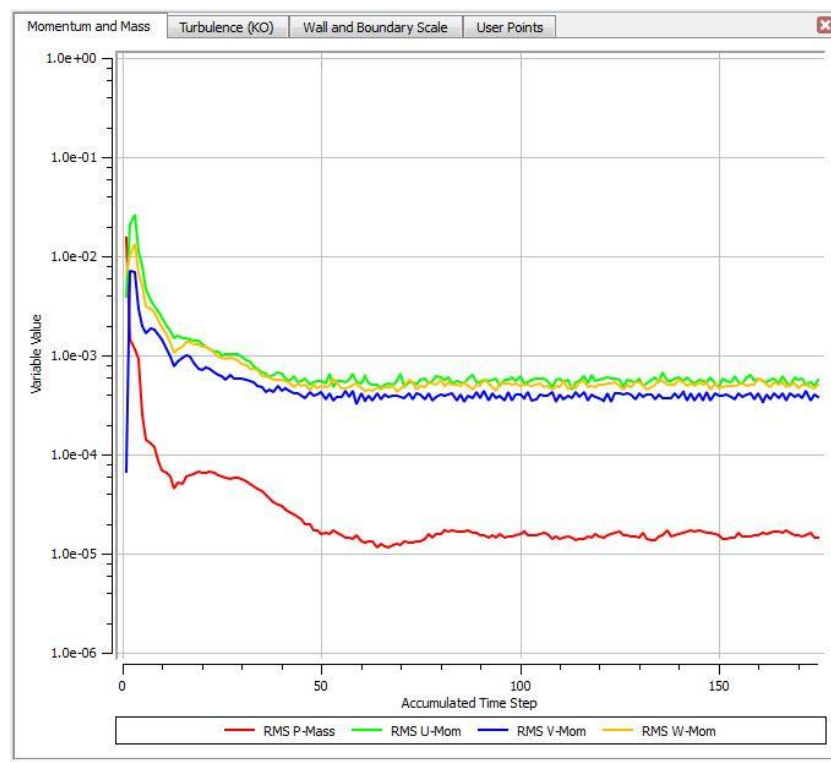


Gràfic 6.2 Yplus en funció de la corda

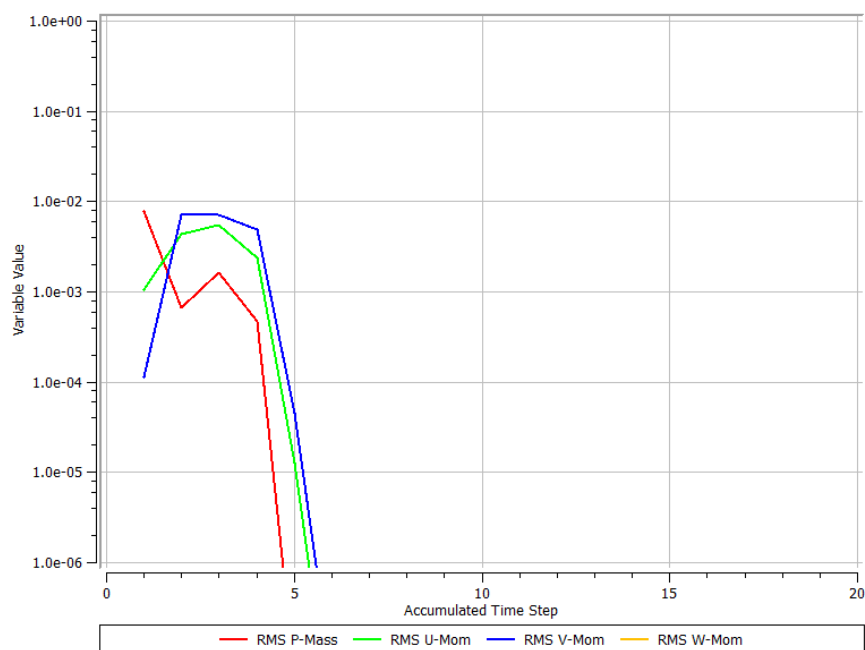
## 6.6. Càlcul de la solució

Durant la solució es visualitzen els gràfics dels residus per controlar la convergència. La solució finalitza o bé quan els valors dels residus (diferència entre el valor de la iteració anterior i l'actual) és inferior a  $1e-4$  o bé quan s'assoleix el número màxim d'iteracions fixat (*Gràfic 6.3*). Si al arribar a les 200 iteracions, el valor d'alguns dels residus es superior a  $1e-4$  (o  $1e-3$ ) i la tendència de la gràfica és anar cada vegada a valors més petits, cal tornar a iterar o incrementar el número màxim d'iteracions, per així garantir que la solució convergeixi. En cas que la solució hagi convergit però els residus oscil·lin notablement sobre un mateix valor, cal seleccionar un valor de *timescale* inferior que faci més lenta la simulació i estabilitzi els residus, doncs pot ser que la solució no hagi assolit un valor estable a causa, per exemple, de la formació de grans turbulències. Si la solució no convergeix, cal revisar el mallat o les condicions de contorn aplicades (*Gràfic 6.4*).



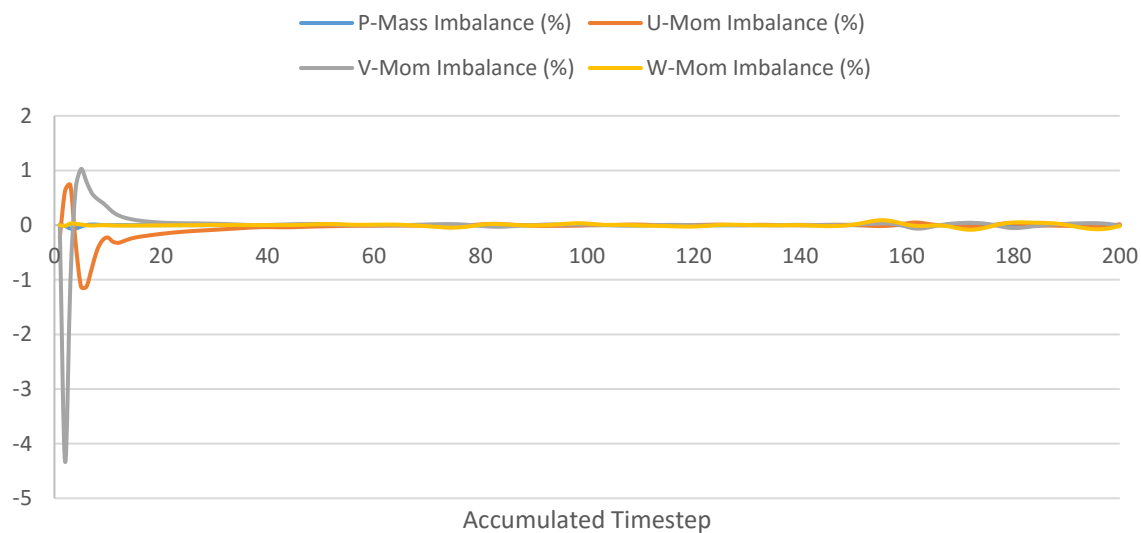


Gràfic 6.3 Residus en que la solució convergeix



Gràfic 6.4 Residus en que la solució no convergeix

Finalment, abans de mirar els resultats obtinguts, és important comprovar els *Imbalance* de la simulació (Gràfic 6.5). Si aquests tendeixen a zero, significa que es compleixen els principis de conservació de la massa i de la quantitat de moviment.



Gràfic 6.5 Imbalance de la solució que convergeix



## 7. Simulacions i discussió de resultats

En aquest apartat es representen les accions aerodinàmiques que transcorren sobre la coberta en cadascun dels casos estudiats. S'il·lustren la distribució de pressions i les línies de corrent al voltant del cos, així com les *Isosurfaces* que permeten visualitzar els remolins presents en el deixant.

Recordar que en aquest projecte s'ha estudiat la influència de la llargària de la coberta en les accions aerodinàmiques a més a més de l'efecte de l'orientació del vent. És per això que en els següents apartats es comenten tres geometries: la coberta base amb les dimensions base d'una pista de pàdel (22 m), una coberta més estreta de 13,2 m i una coberta infinita en direcció transversal.

**Casos estudiats amb el CFX**

Coberta / Graus	0°	15°	30°	45°
Base	✓	✓	✓	✓
Estreta	✓	✓	✓	✓
Infinita	✓	✓	✓	✓

Taula 7.1 Casos que s'han simulat en aquest estudi

En el cas de la coberta infinita s'ha observat que tot i mostrar uns resultats correctes a la zona central del domini, no s'ha aconseguit negligir l'efecte de les parets laterals. A les *Figures 7.1* i *7.2* s'observa la distribució de les pressions sobre el sostre de la coberta quan l'angle d'orientació és de 0° i 45°, respectivament, i en les *Figures 7.3* i *7.4* s'il·lustra la turbulència, on s'observa amb més claredat el fet comentat. Per aquest motiu només s'han presentat valors de les pressions sobre la teulada tenint en compte la problemàtica observada.

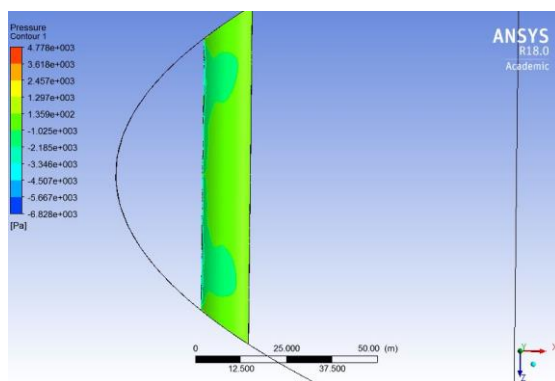


Figura 7.1 Pressions 0°

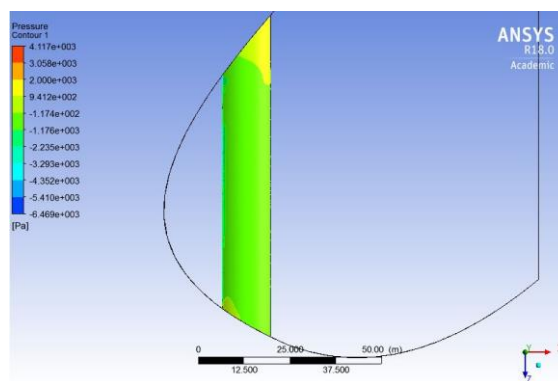


Figura 7.2 Pressions 45°



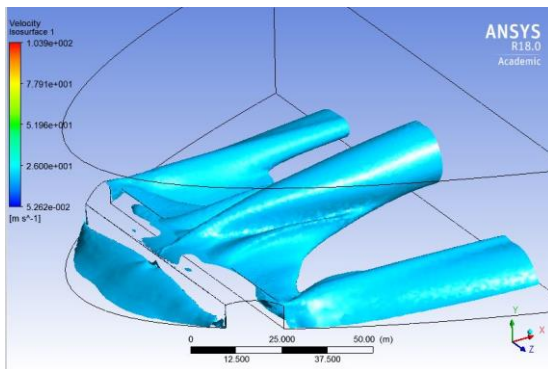


Figura 7.3 Turbulència 0°

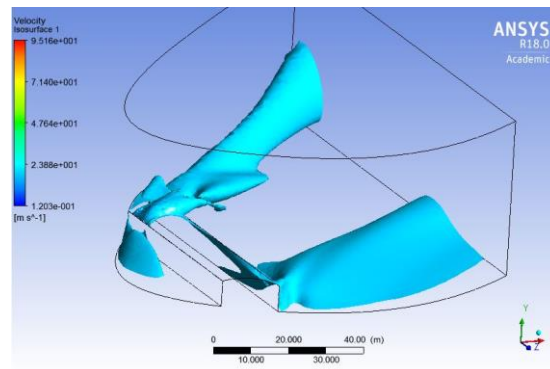


Figura 7.4 Turbulència 45°

## 7.1. Domini amb coberta base

De la *Figura 7.5* a la *7.8* es pot observar la variació de la distribució de pressions sobre el sostre de la coberta segons les diferents orientacions d'incidència del vent. En el primer cas (0°) les pressions són més uniformes, tot i produir-se un petit desprendiment de la capa límit a la part frontal del sostre. A mesura que es varia la orientació del vent, les pressions deixen de ser uniformes i augmenten els valors màxims i mínims.

Les *Figures* de la *7.9* a la *7.12* il·lustren les zones de turbulència. Destacar que el deixant varia molt notablement amb l'angle d'incidència del vent, donat que apareixen remolins en la direcció d'aquest.

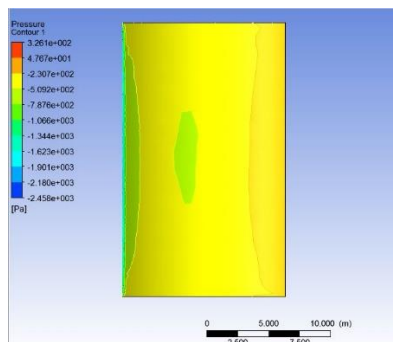


Figura 7.5 Pressions 0°

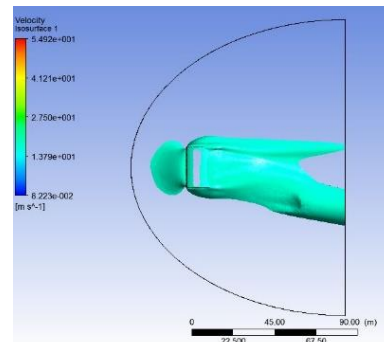


Figura 7.9 Isosurface velocitat 0°





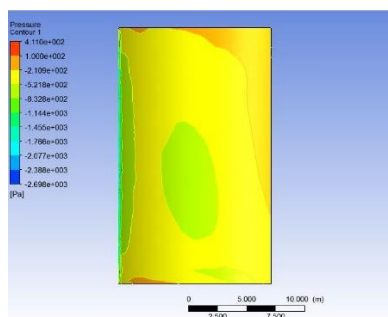


Figura 7.6 Pressions 15°

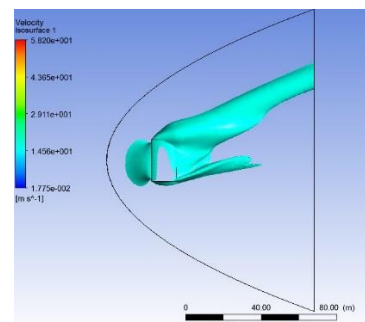


Figura 7.10 Isosurface velocitat 15°

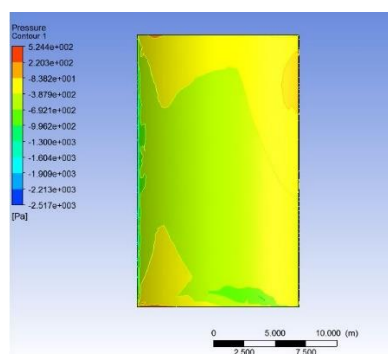


Figura 7.7 Pressions 30°

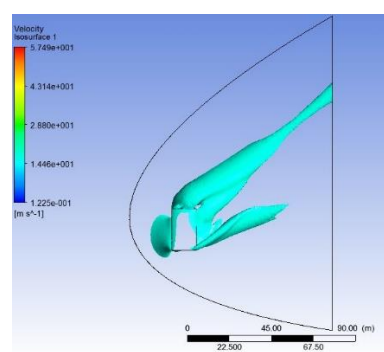


Figura 7.11 Isosurface velocitat 30°

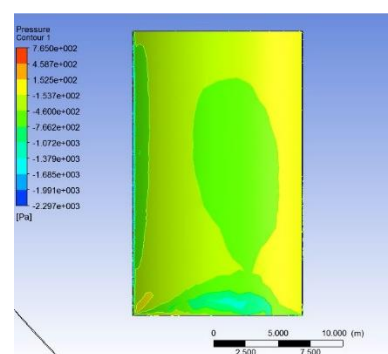


Figura 7.8 Pressions 45°

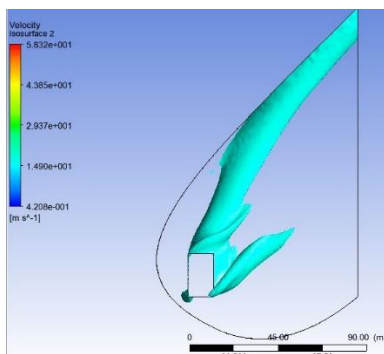
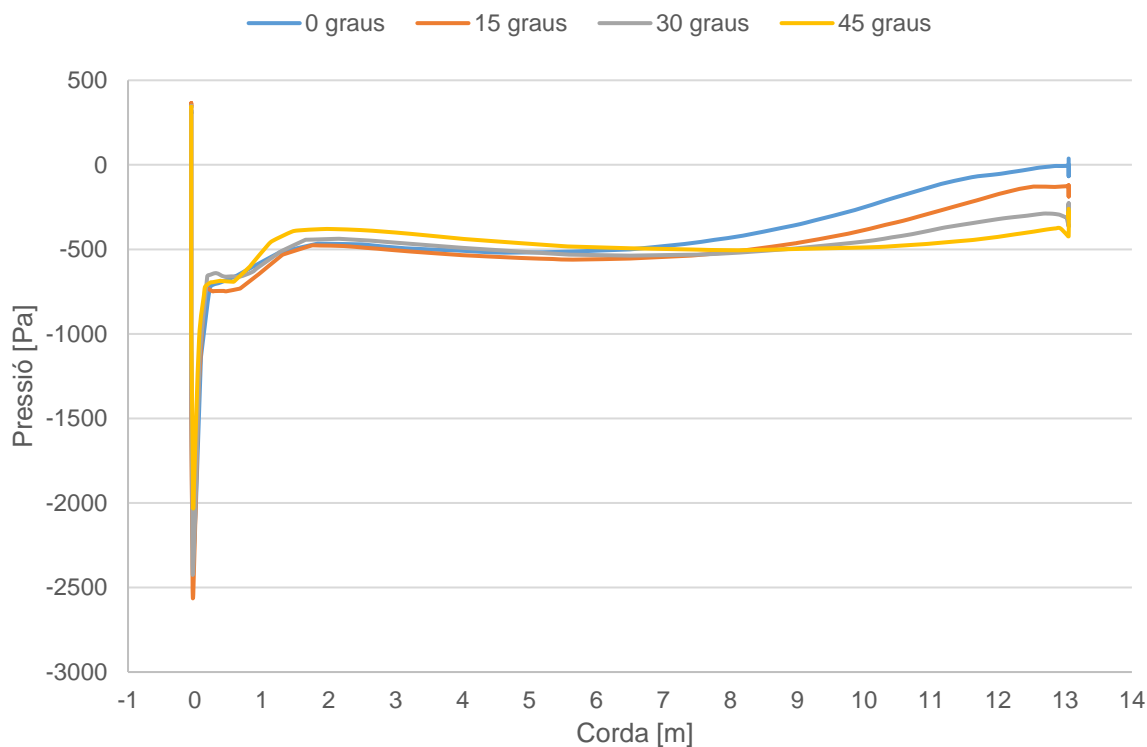


Figura 7.12 Isosurface velocitat 45°

Per a entendre millor aquesta variació en la distribució de pressions sobre el sostre de la coberta, el Gràfic 7.1 mostra l'evolució de les pressions al llarg del perfil de la coberta pertanyen al pla de simetria geomètrica.



Gràfic 7.1 Evolució pressions al llarg de la corda

Per entendre l'efecte de la coberta en el flux d'aire incident, es mostren a les *Figures 7.13 i 7.14* les línies de corrent en els casos de  $0^\circ$  i  $45^\circ$ , on es poden observar els diferents deixants.

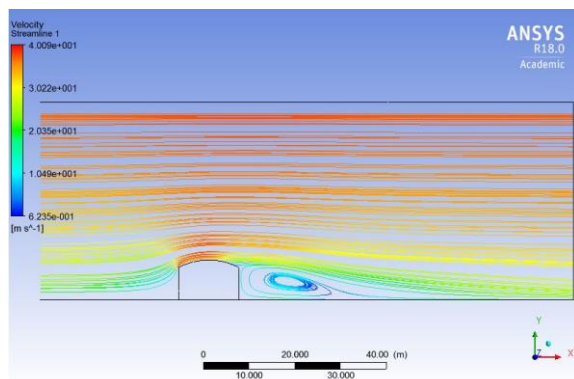


Figura 7.13 Línies de corrent  $0^\circ$

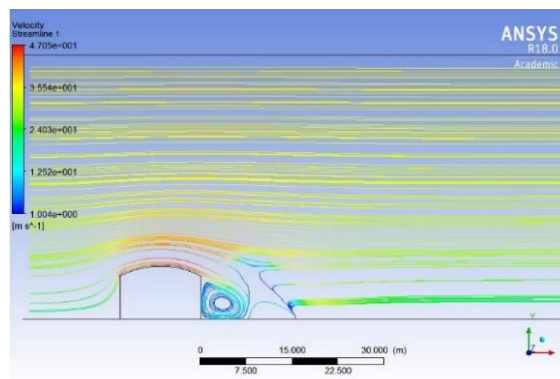


Figura 7.14 Línies de corrent  $45^\circ$

## 7.2. Domini amb coberta estreta

De manera anàloga, es mostren la variació de la distribució de pressions sobre el sostre de la coberta de la *Figura 7.15* a la *Figura 7.18*. En aquest cap no hi ha cap orientació del vent que provoqui una distribució uniforme, però es pot observar una evolució similar a l'anterior.



Destacar que les pressions són lleugerament inferiors i que augmenten els valors extrems amb l'angle d'orientació.

Les figures de la 7.19 a la 7.22 il·lustren les zones amb flux separat. Destacar que el deixant varia molt notablement amb l'angle d'incidència del vent de forma similar al cas de la coberta base. Observar que quan el vent canvia la direcció d'incidència respecte la perpendicular, apareixen remolins d'extrem de la coberta.

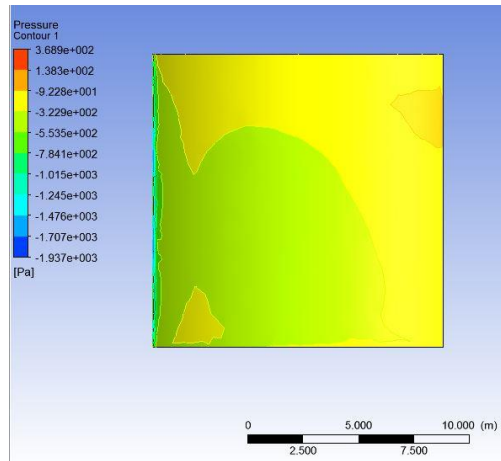


Figura 7.15 Pressions 0°

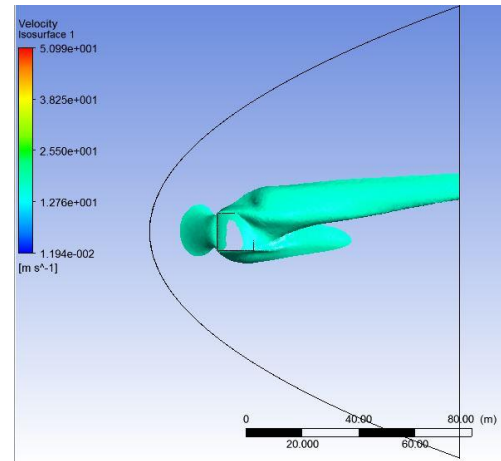


Figura 7.19 Isosurface velocitat 0°

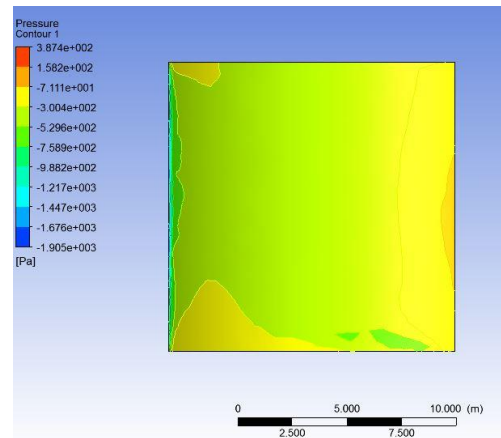


Figura 7.16 Pressions 15°

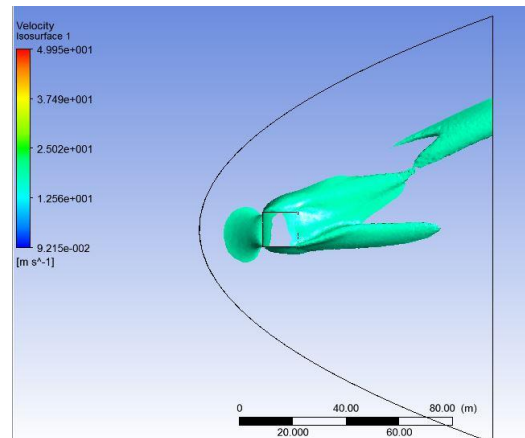


Figura 7.20 Isosurface velocitat 15°

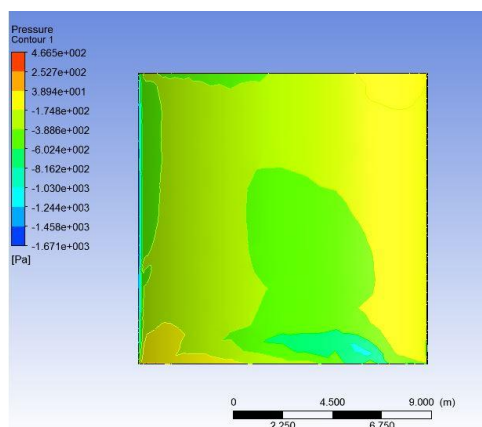


Figura 7.17 Pressions 30°

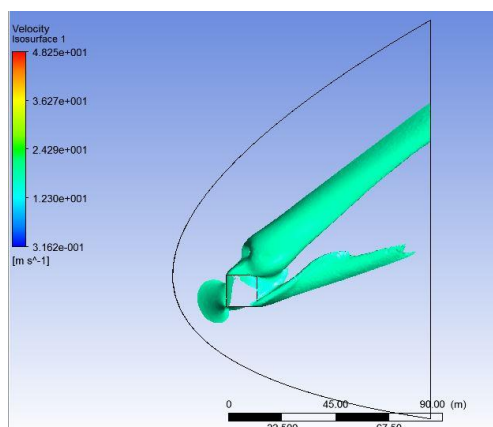


Figura 7.21 Isosurface velocitat 30°

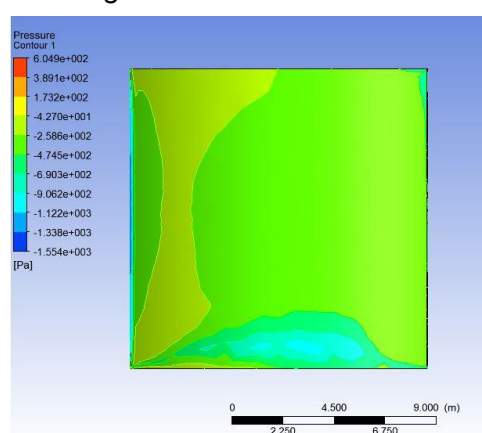


Figura 7.18 Pressions 45°

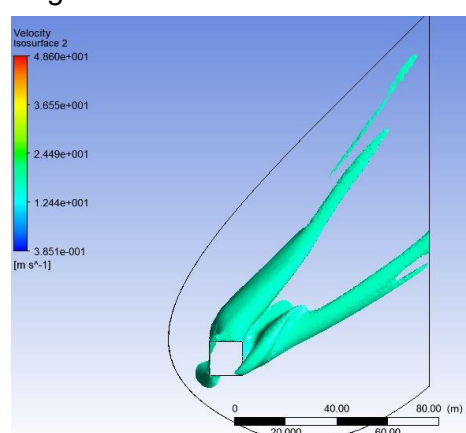
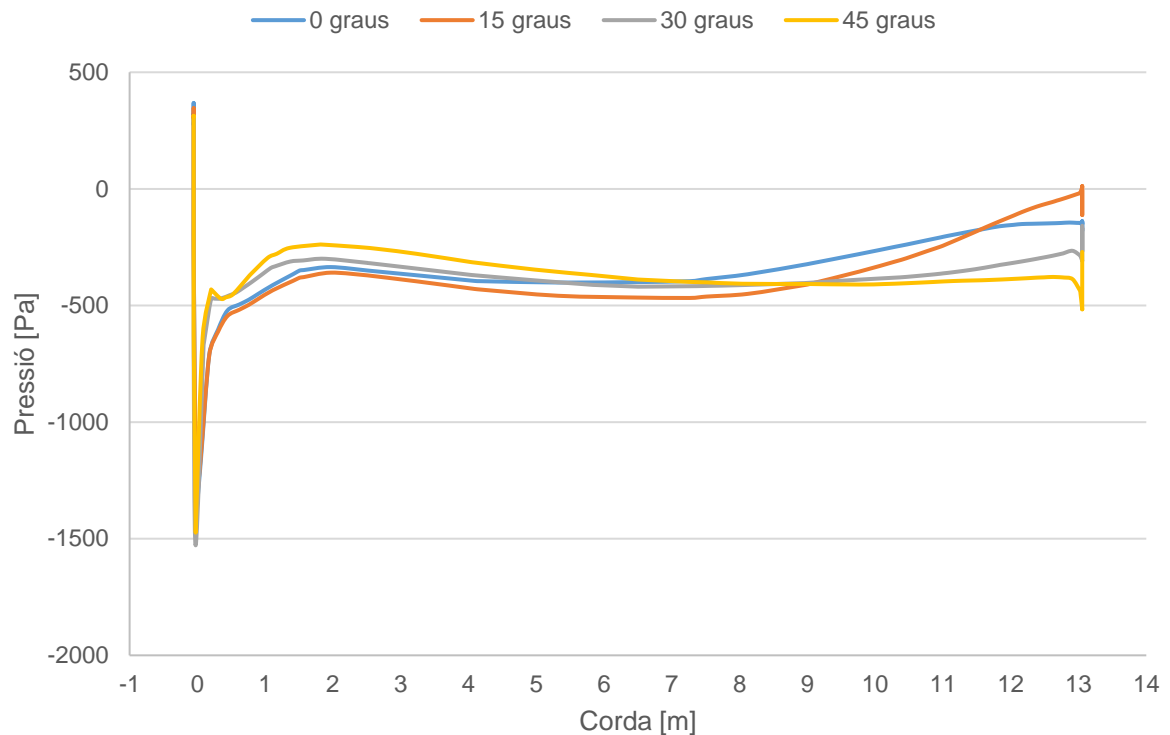


Figura 7.22 Isosurface velocitat 45°

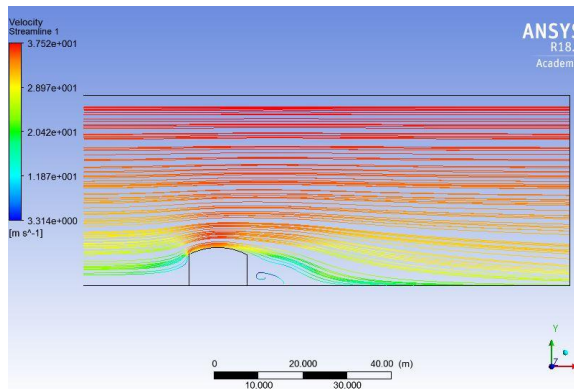
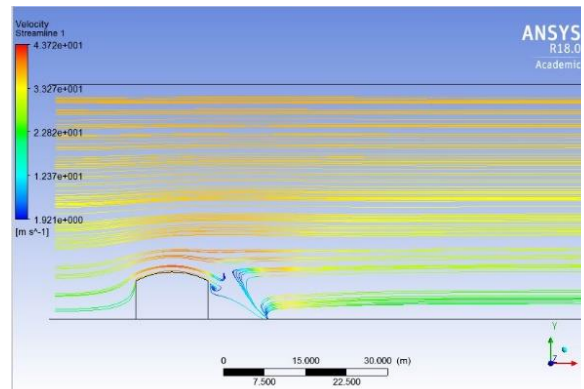
El Gràfic 7.2 mostra l'evolució de les pressions al llarg del perfil de la coberta corresponent al pla de simetria geomètrica i permet s'observa amb més claredat la variació en la distribució de pressions sobre el sostre de la coberta.





Gràfic 7.2 Evolució pressions al llarg de la corda

Les *Figures 7.23 i 7.24* mostren les línies de corrent en els casos de  $0^\circ$  i  $45^\circ$ , on es poden observar els diferents deixants.

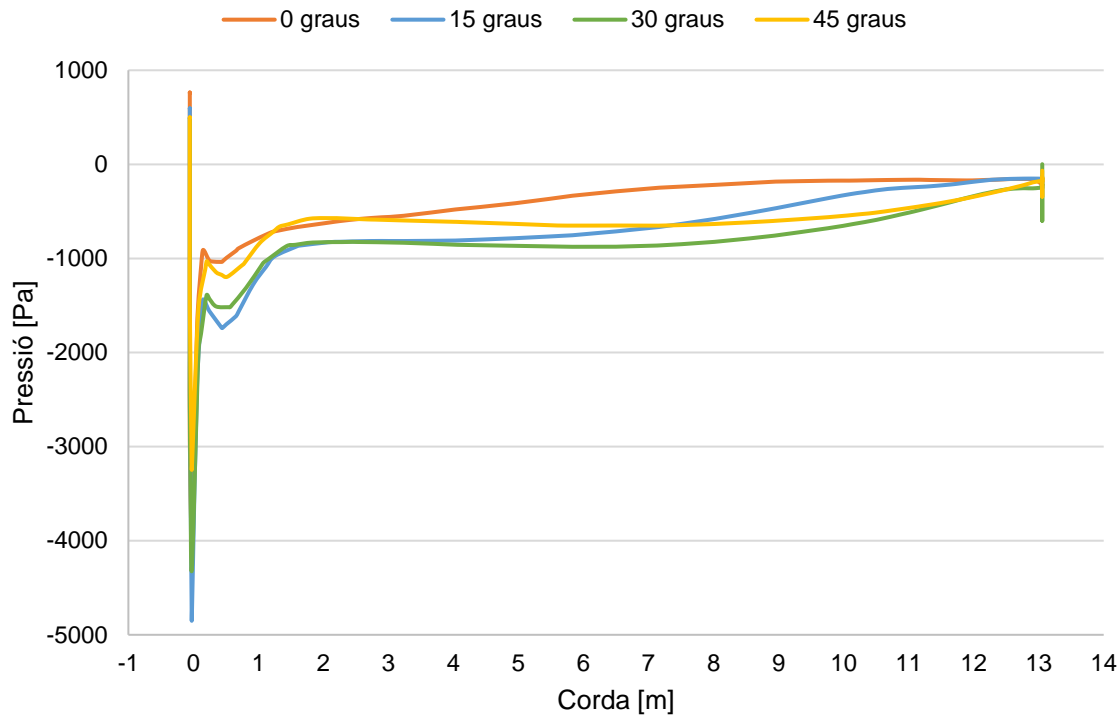
Figura 7.23 Línies de corrent  $0^\circ$ Figura 7.24 Línies de corrent  $45^\circ$ 

### 7.3. Domini amb coberta infinita

L'objectiu principal d'estudiar una coberta infinita és poder menystenir els efectes laterals dels seus extrems i veure així les accions aerodinàmiques provocades únicament pel perfil del sostre de la coberta. D'aquest cas només s'analitzarà l'evolució de la distribució de pressions sobre el sostre de la coberta per tal de poder extreure'n resultats i comparar-los amb la

normativa.

El Gràfic 7.3, com en els altres dos casos, mostra l'evolució de les pressions al llarg del perfil de la coberta corresponent al pla de simetria. Mencionar que el pla de simetria no està afectat pels efectes laterals d'aquesta coberta infinita.



Gràfic 7.3 Evolució pressions al llarg de la corda

## 7.4. Comparativa amb la normativa europea

Per a compara els resultats obtinguts de les simulacions amb la normativa europea, s'ha examinat com s'han calculat els valors de pressió sobre la coberta que apareixen en aquesta. És per això que s'ha determinat la pressió de cada tram i per cada angle d'incidència estudiat i s'ha pres el valor màxim de cadascun dels trams (*Taula 7.2*).



**Pressions [Pa]**

<b>Coberta Base</b>					
<b>Graus</b>	<b>0°</b>	<b>15°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>Màxim</b>
<i>Tram A</i>	-534,66	-527,32	-466,12	-461,42	-534,66
<i>Tram B</i>	-428,64	-445,70	-465,74	-482,79	-482,79
<i>Tram C</i>	-143,92	-266,80	-341,04	-421,73	-421,73

<b>Coberta estreta</b>					
<b>Graus</b>	<b>0°</b>	<b>15°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>Màxim</b>
<i>Tram A</i>	-396,30	-407,58	-352,02	-293,25	-407,58
<i>Tram B</i>	-331,38	-426,62	-388,03	-307,52	-426,62
<i>Tram C</i>	-192,07	-241,38	-314,71	-409,84	-409,84

<b>Coberta infinita</b>					
<b>Graus</b>	<b>0°</b>	<b>15°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>Màxim</b>
<i>Tram A</i>	-1291,5	-1210,4	-1010,9	-775,00	-1291,5
<i>Tram B</i>	-778,03	-732,40	-619,53	-506,46	-778,03
<i>Tram C</i>	-377,68	-339,42	-279,84	-267,29	-377,68

*Taula 7.2* Resum de les pressions per tram de cada coberta

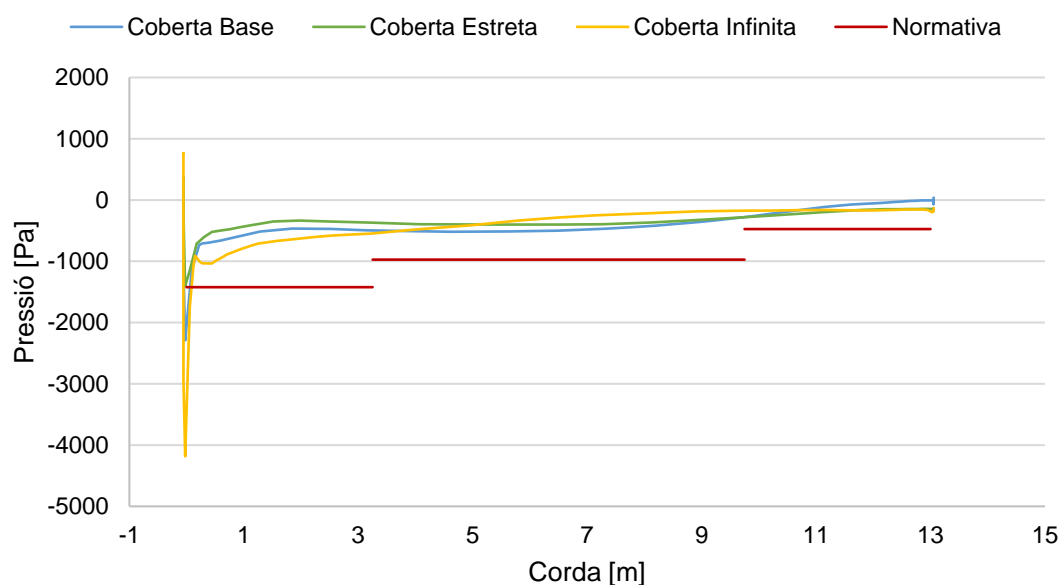
La *Taula 7.3* recull les pressions màximes i els valors de la normativa vigent. Es pot observar que els valors que concorden amb els de la normativa són els corresponents a la coberta amb geometria infinita. Aquests són lleugerament inferiors, doncs la normativa és més restrictiva i per tant considerem validada la simulació.

**Pressions [Pa]**

<b>Coberta</b>	<b>Base</b>	<b>Estreta</b>	<b>Infinita</b>	<b>Normativa</b>
<i>Tram A</i>	-534,66	-407,58	-1291,5	-1422,3
<i>Tram B</i>	-482,79	-426,62	-778,03	-971,93
<i>Tram C</i>	-421,73	-409,84	-377,68	-474,11

Taula 7.3 Resum pressions màximes i normativa

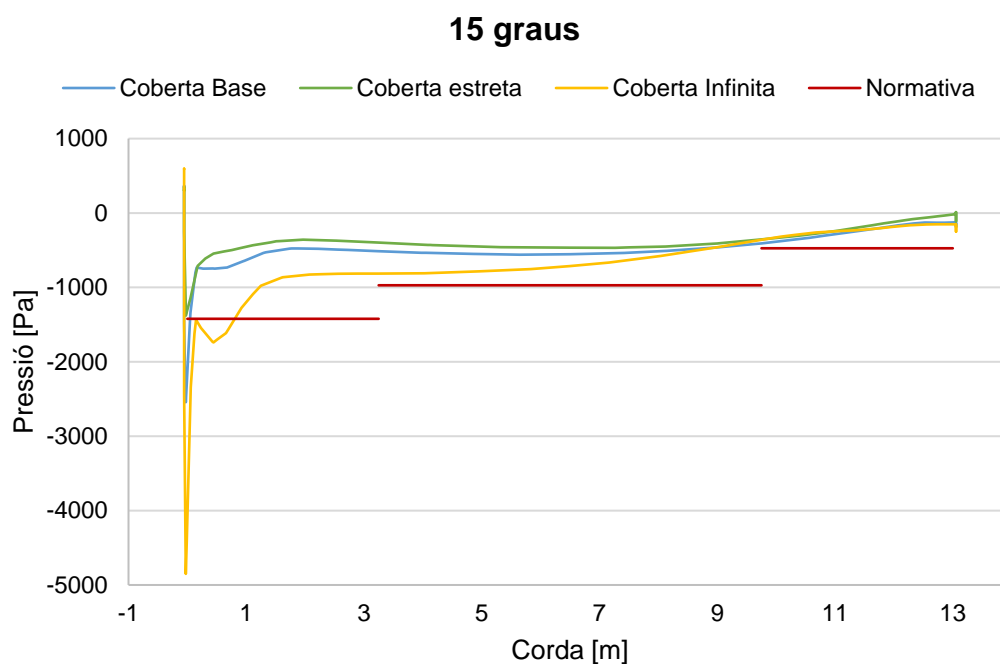
En els gràfics següents es pot observar de forma més clara la similitud entre els resultats obtinguts mitjançant les simulacions i els valors de la normativa europea. Amb els quatre diferents angles d'incidència s'observa que s'aproximen als valors de la normativa.

**0 graus**

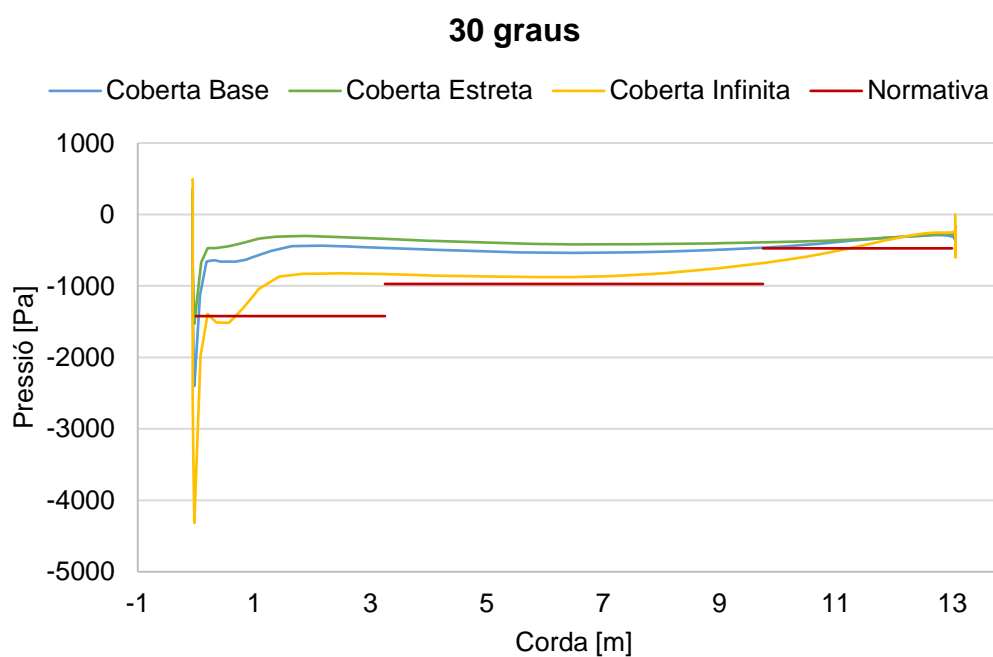
Gràfic 7.4 Pressions al llarg de la corda de cada coberta a 0°



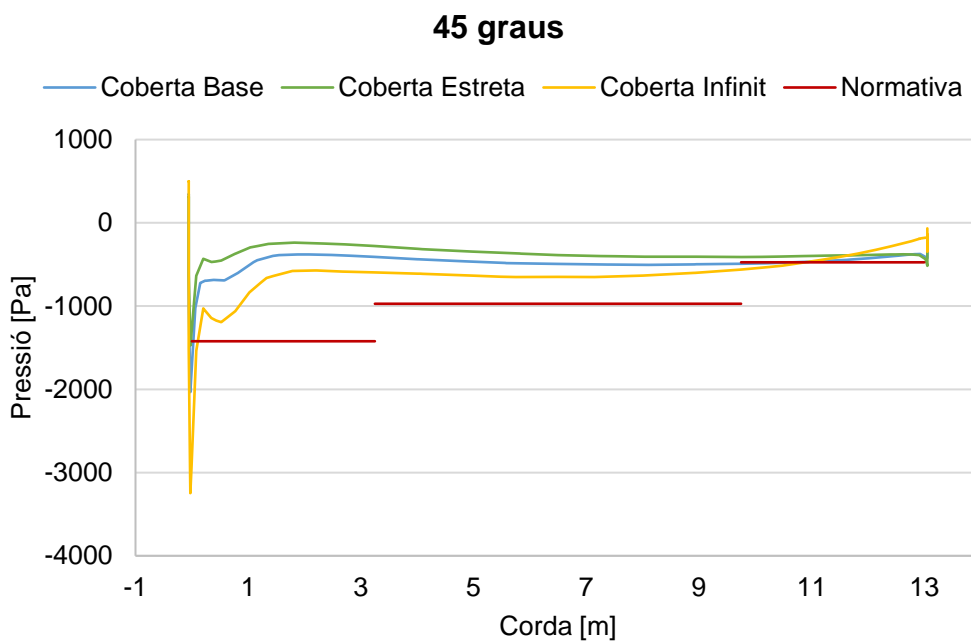




Gràfic 7.5 Pressions al llarg de la corda de cada coberta a 15°



Gràfic 7.6 Pressions al llarg de la corda de cada coberta a 30°



Gràfic 7.7 Pressions al llarg de la corda de cada coberta a 45°

## 7.5. Proposta de millora pel cas infinit

Una proposta de treball futur i necessària per a corroborar els resultats obtinguts consisteix en modificar el domini de l'estudi del cas de la coberta infinita per tal de solucionar la problemàtica observada.

Estudiant aquest cas amb més cura s'ha determinat com hauria de ser el domini pel cas d'aquesta coberta. Es podria realitzar amb un 2D, fixant condicions de simetria en les dues cares laterals del domini. El pla de simetria seria idoni per al cas en que el vent incideix perpendicularment a la coberta. A mesura que s'anés variant la orientació d'incidència, s'ha de fer la simulació en 2D agafant un pla que tallés la coberta en aquella direcció (*Figura 7.25*). Tot i això, no ha estat possible realitzar cap simulació més en aquest projecte per falta de temps.

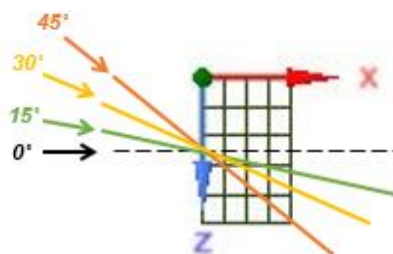


Figura 7.25 Plans segons la orientació del vent



## 8. Planificació

A la *Taula 8.1* s'esmenen cadascuna de les etapes o activitats que s'han dut a terme en la realització d'aquest projecte.

<b>Activitat</b>	<b>Inici</b>	<b>Duració [dies]</b>	<b>Final</b>
<i>Estudi previ</i>	03/09/2016	17	20/09/2016
<i>Definició continuació projecte</i>	20/09/2016	2	22/09/2016
<i>Estudi sensibilitat mallat</i>	22/09/2016	103	03/01/2017
<i>Definició casos a estudiar</i>	10/10/2016	26	05/11/2016
<i>Estudi normativa europea</i>	09/10/2016	42	20/11/2016
<i>Simulació coberts base</i>	05/01/2017	66	12/03/2017
<i>Simulació coberta estreta</i>	15/03/2017	13	28/03/2017
<i>Simulació coberta infinita</i>	28/03/2017	19	16/04/2017
<i>Obtenció de resultats i anàlisi de dades</i>	01/03/2017	50	20/04/2017
<i>Comparació i discussió dels resultats</i>	21/04/2017	60	20/06/2017
<i>Redacció memòria</i>	28/05/2017	58	25/07/2017
<i>Pressupost</i>	21/07/2017	1	22/07/2017
<i>Impacte ambiental</i>	22/07/2017	1	23/07/2017
<i>Conclusions</i>	22/07/2017	1	23/07/2017
<i>Preparació presentació</i>	27/08/2017	6	02/09/2017

*Taula 8.1* Programació del projecte

El diagrama de Gantt de la *Figura 8.1* permet entendre millor aquesta programació. En aquest es reflexa l'evolució del treball amb la seva corresponent duració. A més a més, es poden diferenciar clarament quines són les etapes de major durabilitat i quines altres han requerit menor temps per a dur-les a terme. Com s'observa al diagrama de Gantt, l'estudi de sensibilitat del mallat i la realització de totes les simulacions són el que ha requerit el major temps de treball

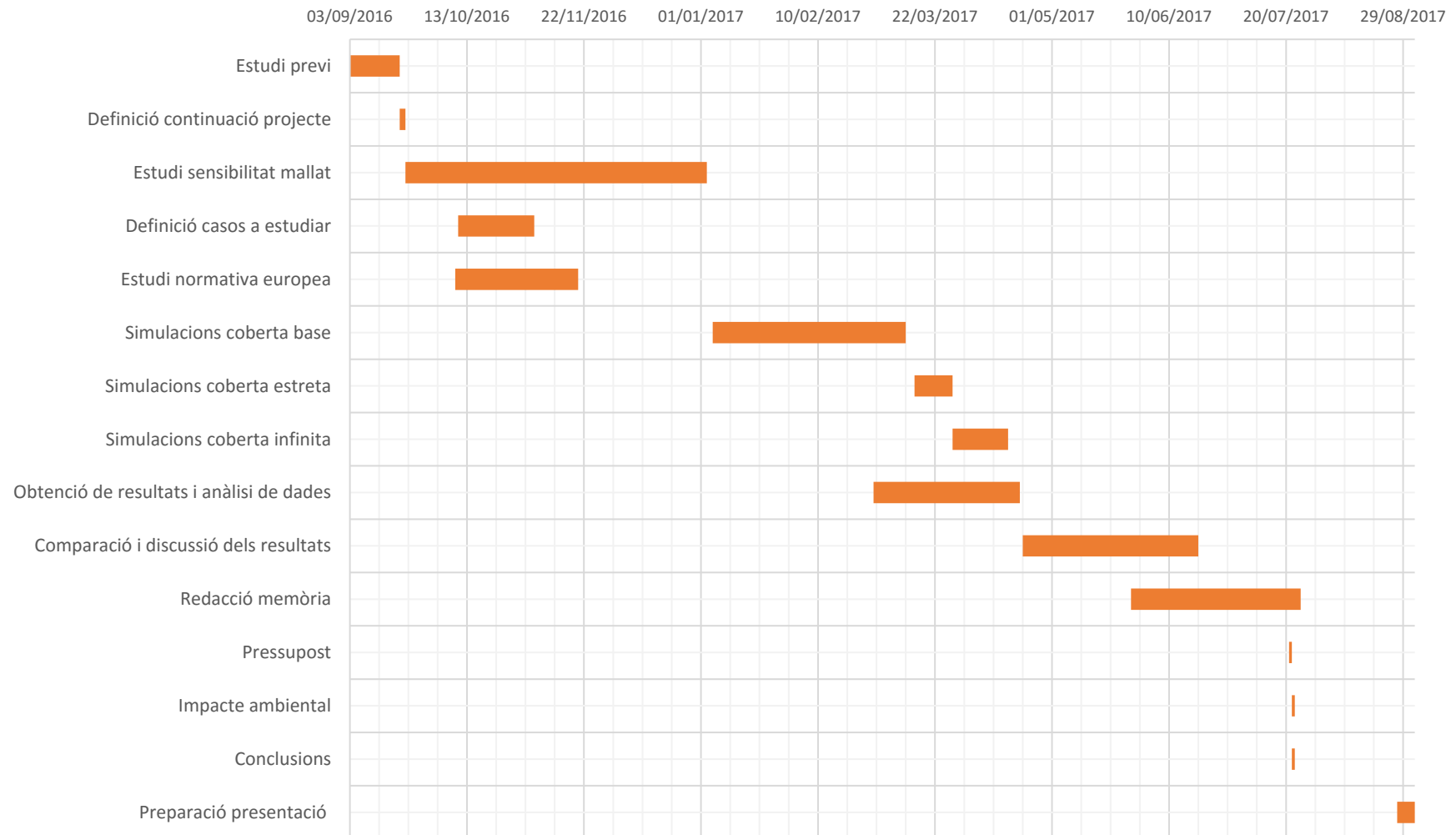


Figura 8.1 Diagrama de Gantt del projecte

## 9. Impacte mediambiental

En aquest capítol s'identificaran i avaluaran els efectes provocats pel projecte sobre el medi físic i social, tant durant la realització d'aquest com els que podrien sorgir en la construcció de les cobertes en les pistes de clubs esportius.

### 9.1. Referent a l'elaboració del projecte

Pel que fa a l'impacte mediambiental durant la realització del projecte, degut a la naturalesa d'aquest no es considera rellevant la realització d'un estudi exhaustiu d'impacte ambiental, ja que es tracta d'un procés de disseny, simulació i comparació dels resultats obtinguts generat íntegrament per ordinador. A més a més, tampoc es disposa d'una part experimental. Tot i això, s'analitzaran els recursos consumits durant la realització del projecte i els residus generats per l'ús de consumibles [14].

L'impacte ambiental provocat pels recursos consumits durant la realització del projecte es redueix a les emissions de CO<sub>2</sub> derivades del consum elèctric; tant per a il·luminar la zona de treball, com per a fer funcionar l'ordinador. Per a calcular les emissions citades, es considera que 1 kWh produeix 0,65 kg de CO<sub>2</sub>, tal com estableix la Comissió Europea. En la *Taula 9.1* es mostra de forma desglossada aquest impacte ambiental.

#### Emissions de CO<sub>2</sub> durant l'elaboració del projecte

Element de consum	Temps de consum [h]	Consum de potència [W]	Consum d'energia [kWh]	Consum de CO <sub>2</sub> [kg]
<i>Ordinador</i>	650	200	130	84,5
<i>Il·luminació</i>	200	90	18	11,7

**EMISSIONS TOTALS DE CO<sub>2</sub>:** 96,2

*Taula 9.1* Emissions de CO<sub>2</sub> totals derivades del consum elèctric

A més a més, pel que fa als residus generats per l'ús de consumibles, cal tenir en compte que per a dur a terme el projecte s'ha utilitzat paper en format A4 (6,24 m<sup>2</sup> d'àrea); tant durant la elaboració del projecte, com en la impressió de la memòria del projecte. S'ha utilitzat aproximadament 150 fulls blancs de format A4 amb un gramatge de 90 g/m<sup>2</sup>. Això suposa un pes total de 0,56 kg que representa 1,68 kg de CO<sub>2</sub> per full utilitzat. La Comissió Europea estableix que 1 kg de paper blanc equival a 3 kg de CO<sub>2</sub>.

## 9.2. Referent a la construcció de la coberta

En quant a la construcció de la coberta, primerament seria necessari obtenir dades experimentals per a poder corroborar els resultats obtinguts en la simulació. Això comportaria l'ús de consumibles i de consum elèctric per a l'ús dels dispositius emprats en la recollida de dades.

L'impacte ambiental més important d'aquest projecte seria en la construcció de la pròpia coberta. Tot i que l'impacte seria de petita magnitud, caldria fer una avaluació i, posteriorment, un estudi d'impacte ambiental (EIA). L'efecte de la construcció de dita coberta sobre el medi físic i social vindria donat pels materials emprats per a la fabricació de la marquesina i la xapa del sostre, per l'ús de maquinaria durant la construcció de la coberta i per l'impacte visual que aquest podria causar durant la instal·lació sobre la pista, entre d'altres.

Pel que fa al medi social, un cop construïda i instal·lada la coberta en varis clubs esportius, es considerarà l'efecte sobre l'entorn sociocultural i econòmic.



## 10. Pressupost

El pressupost dels costos totals s'enfoca com si es tractes d'una empresa que duu a terme aquest projecte. En aquest apartat es detallen els costos necessaris per a la realització del projecte. Es detallen dos tipus de costos: els costos directes i els indirectes.

### 10.1. Costos directes

Al tractar-se d'un estudi teòric, la major part del pressupost recau en les hores invertides per part d'un enginyer exercides en les diferents fases, dutes a terme de manera alternada al llarg de tot el projecte, amb una duració total estimada de 650 h. Aquests són els costos de recursos humans.

S'estima que el salari anual d'un enginyer és de 40.000 € per a 1.800 h anuals treballades **Error! Reference source not found..** S'ha de tenir en compte que cal sumar-li el 30% referent a la Seguretat Social. En aquest càlcul no es té en compte altres tipus de beneficis socials que puguin haver inclòsos en el contracte. Per tant, el salari d'un enginyer industrial és de 28,89 €/h.

En els costos directes es té també en compte els costos del material que es necessita per a dur a terme el projecte. Entenem com a material el propi d'oficina (paper, bolígrafs, llapis, impressora, etc.), l'ordinador, les llicències dels programes utilitzats i altres, doncs no es construeix cap prototip.

Per al càlcul de l'amortització s'ha estimat una vida útil de 3 anys per l'ordinador, 2 anys pel software de disseny SolidWorks i de 3 anys pel de simulació ANSYS, ambdós treballant a raó de 20h setmanals.

#### Costos directes

Concepte	Temps invertit [h]	Salari [€/h]	Total [€]
<i>Documentació i estudis previs</i>	50	28,89	1.444,50
<i>Modelat amb SolidWorks</i>	30	28,89	866,7
<i>Simulació</i>	390	28,89	11.267,1

Anàlisis resultats	180	28,89	5.200,2	
Concepte	Preu adquisició [€]	Vida útil [h]	Utilització [h]	Total [€]
Material d'oficina	-	-	-	100,00
Ordinador personal	3.000	2.880	650	677,08
SolidWorks	6.000	1.920	30	93,75
ANSYS Workbench 16.1	30.000	2.880	470	4.895,83
COST TOTAL:				24.545,16

Taula 10.1 Càlcul desglossat dels costos directes

## 10.2. Costos indirectes imputables

En els costos indirectes es té en compte els costos que es deriven de l'ús dels recursos materials, en concret els que es deriven de l'ús de l'ordinador, com són els costos de consum elèctric i la connexió a internet.

Per comptabilitzar la despesa energètica s'ha considerat que l'ordinador personal s'ha utilitzat per a les fases de documentació, estudi de mallat, simulació i anàlisi de resultats. En total són aproximadament 650 h.

Costos indirectes				
Concepte	Consum [kW]	Utilització	Preu unitari	Total [€]
<i>Consum elèctric</i>	0,2	650 h	0,15 €/kWh	19,50
<i>Connexió a internet</i>	-	7 mesos	38,82 €/mes	271,74
<b>COST TOTAL:</b>				291,24

Taula 10.2 Càlcul desglossat dels costos indirectes





### 10.3. Cost total del projecte

Per a fer una correcta estimació del cost total del projecte, cal tenir present els costos indirectes no imputables. Aquests engloben els costos de lloguer d'un local, el subministrament d'aigua i gas, el servei de manteniment de les instal·lacions, el cost del consum elèctric de l'il·luminat utilitzat, els costos provinents dels departaments de comptabilitat, administració, recursos humans, entre d'altres. L'empresa on es duu a terme el projecte establirà un percentatge sobre els costos totals que representi l'acord que s'hagi establert per a quantificar els costos indirectes no imputables i el marge a aplicar per a l'obtenció de beneficis amb la realització d'aquest projecte.

A continuació es mostra el cost total de la realització del projecte.

#### Costos totals del projecte

Concepte	Percentatge [%]	Cost [€]
<i>Costos directes</i>	-	24.545,16
<i>Costos indirectes imputables</i>	-	291,24
<i>Total costos imputables</i>	-	24.836,4
<i>Costos indirectes no imputables</i>	10	2.483,64
<i>Marge</i>	5	1.241,82
<b>COST TOTAL:</b>		28.561,86

Taula 10.3 Càlcul desglossat del cost total del projecte

## Conclusions

La valoració del projecte desenvolupat és molt positiva. Ha estat molt enriquidor, doncs s'ha aprofundit en l'àmbit de la mecànica de fluids referent al comportament de fluxos al voltant d'un cos, s'ha adquirit una gran agilitat amb el software CFX de l'ANSYS i s'ha analitzat la normativa per a comprar-la amb els resultats obtinguts. Remarca que s'han assolit els objectius establerts inicialment:

- S'ha observat la forta influència de l'orientació del vent sobre les accions fluidodinàmiques que s'exerceixen sobre la coberta.
- S'ha observat que al modificar la llargada de la coberta varien les accions fluidodinàmiques del vent.
- S'ha après en profunditat el funcionament del programari CFX, aprenent a definir de forma òptima el domini, el mallat i les condicions de contorn.

A continuació unes valoracions en concret de les simulacions dutes a terme:

- *Distribució de pressions:* S'ha observat com amb la variació de l'orientació de l'angle d'incidència les pressions deixaven de ser uniformes, tant per al cas de la coberta base com l'estreta.
- *Flux separat amb vorticitat:* S'ha observat com apareixia un gran deixant a la part posterior de la coberta. Tant en la coberta base com en l'estreta, s'ha observat que aquest remolí es formava en la direcció de l'orientació del vent en cada cas.
- *Coberta infinita:* Es considera que no s'ha simulat correctament, i per tant cal refer les simulacions per a menystenir del tot els efectes de les parets laterals i evitar els remolins que apareixen en els extrems.

Fent referència a la normativa, s'han comparat els valors de les pressions obtingudes amb els estipulats per a cada cas i s'ha observat que aquests són molt propers, sent els de la normativa lleugerament superiors al ser més restrictius. Aquest fet dóna veracitat al projecte.

Durant la realització d'aquest estudi, l'interès en la matèria ha anat creixent i s'han plantejat millores per assegurar els resultats obtinguts. Es proposen les següents vies de continuació:

- Analitzar la coberta infinita fent simulacions en 2D, variant el domini a estudiar segons l'angle d'orientació.
- Realitzar una simulació en 3D amb la geometria real de la coberta, és a dir, incloent els 4 pilars de sustentació i no considerar les parets laterals.



## Agraïments

M'agradaria donar les gràcies al meu tutor, Xavier Escaler, per oferir-me la possibilitat de continuar participant en aquest projecte que he trobat no només interessant en l'àmbit acadèmic sinó molt enriquidor a nivell personal. Així com també pel suport durant la realització d'aquest, guiant-me, aconsellant-me i resolent tots els dubtes que m'han sorgit. La seva disposició ha sigut incondicional, fins i tot durant períodes de vacances.

Així mateix, agrair a Miquel Casafont per orientar-nos i guiar-nos des d'un inici i assessorar-nos en l'anàlisi dels resultats des del punt de vista d'estructures.

Per últim, agrair també el suport incondicional de la meva família, de la meva parella i dels meus amics, que m'han fet costat i m'han ajudat a afrontar els reptes que se m'han anat plantejant al llarg del desenvolupament del projecte i durant el transcurs dels meus estudis a l'ETSEIB.

# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

[1] BERTA ROIG, *Simulació fluidodinàmica de l'acció del vent sobre una coberta d'una instal·lació esportiva*, gener 2016 [Consulta: 05/09/2016]

[2] OFICINA DE VIVIENDA, *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-AE (Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación)*, setembre 2007 [Consulta: 20/10/2016]

<<http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application/pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1310559772658&ssbinary=true>>

[3] INCOPERFIL, *Cubierta pista de padel*, [Consulta: 10/06/2017]

<<http://incoperfil.com/cubierta-pista-de-padel-cms-1-50-406/>>

[4] ISMAEL CANCHO, *Ventajas e inconvenientes de las pistas de pádel indoor y exterior*, febrero 2015 [Consulta: 10/06/2017]

<<http://www.newpadel.es/blog/ventajas-e-inconvenientes-de-las-pistas-de-padel-indoor-y-exterior/>>

[5] FRANK M. WHITE, *Mecánica de fluidos*, Sexta Edición 2008 McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U [Consulta: 17/06/2017]

[6] ALONDRA TORRES, *Número Reynolds*, Universidad Iberoamericana, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Ciudad de México 2008 [Consulta: 17/06/2017]

[7] SAM ADAM, *Fluid flow* [Consulta: 19/06/2017]

<<http://alevelnotes.com/Fluid-Flow/112?tree=>>>

[8] Introduction to ANSYS CFX, Lecture 10: Turbulence, 2012. [Consulta: 25/12/2016]

[9] UNIVERSIDAD DE LA RIOJA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,



*Dinámica de fluidos computacional, CFD* [Consulta: 12/12/2016]

<<http://www.unirioja.es/cu/manuruiz/simulacion%20que%20es%20cf.html>>

**[10]** ANSYS 2016, Inc., *Ansys CFX* [Consulta: 14/12/2015]

<<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>>

**[11]** OFICINA DE VIVIENDA, *Acciones Variables (CTE-DB-SE-AE)*, diapositiva 7 [Consulta 09/01/2016]

<<http://www.structurat.es/mediapool/78/784930/data/acciones.pdf>>

**[12]** EN 1991-1-4:2005 + A1: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. CEN European Committee for Standardization. April 2010 [Consulta: 20/10/2016]

**[13]** CTE-DB-SE-AE. Código Técnico de la Edificación. Documento básico. Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación. Ministerio de Fomento. Abril 2005 [Consulta: 20/10/2016]

**[14]** SERGI FAJAS, *Estudi de les accions del vent sobre una coberta corbada mitjançant simulació numèrica*, juny 2016 [Consulta: 25/09/2016]

**[15]** GONZÁLEZ, M. *Consideraciones ambientales para los PFC*. Dpto. Proyectos de Ingeniería – UPC. Junio de 2011 [Consulta: 04/01/2015]

**[16]** MICHAEL PAGE, *Servicio de Selección de Ingenieros junior, intermedios y directivos* [contacto vía email]